

SPIS TREŚCI

PRZEDMOWA	10
CZĘŚĆ I WYTWARZANIE WYSOKICH NAPIĘĆ PROBIERCZYCH I PRĄDÓW UDAROWYCH W LABORATORIACH WYSOKICH NAPIĘĆ. PRZYRZĄDY I METODY POMIAROWE	11
WSTĘP	12
1. WYTWARZANIE WYSOKICH NAPIĘĆ PROBIERCZYCH I PRĄDÓW UDAROWYCH	13
1.1. Wytwarzanie wysokiego napięcia przemiennego o częstotliwości technicznej ..	13
1.2. Wytwarzanie wysokiego napięcia stałego	16
1.3. Wytwarzanie wysokiego napięcia udarowego	18
1.3.1. Uwagi ogólne	18
1.3.2. Jednostopniowy generator ударов napięciowych (GUN)	19
1.3.3. Wielostopniowy generator ударов napięciowych	21
1.4. Wytwarzanie prądu udarowego	22
1.4.1. Uwagi ogólne	22
1.4.2. Generator ударов prądowych (GUP)	24
2. PRZYRZĄDY I METODY POMIAROWE W LABORATORIACH WYSOKICH NAPIĘĆ	26
2.1. Iskiernik kulowy	26
2.2. Woltomierz elektrostatyczny	30
2.3. Urządzenia do pomiaru przebiegów ударов	31
2.4. Dzielniki i boczniki	34
2.5. Miernik wartości szczytowej	39
2.6. Metoda prostownikowa pomiaru wartości szczytowej napięcia przemiennego ..	40
2.7. Inne metody pomiarowe	41
3. OPRACOWANIE WYNIKÓW DOŚWIADCZEŃ	43
4. SZACOWANIE NIEPEWNOŚCI POMIARU PRZY POMIARACH WYSOKONAPIĘCIOWYCH	46
4.1. Wstęp	46
4.2. Wyznaczanie niepewności kategorii A	46
4.3. Wyznaczanie niepewności kategorii B	47
4.4. Wypadkowa niepewność uwzględniająca obie kategorie niepewności	48
4.5. Przykład obliczania niepewności	48
5. UWAGI OGÓLNE	50
LITERATURA	52



CZĘŚĆ II ĆWICZENIA	53
ĆWICZENIE 1. BADANIE WYTRZYMAŁOŚCI STATYCZNEJ POWIETRZA W UKŁADACH O RÓŻNYCH KSZTAŁTACH ELEKTROD	54
1. WIADOMOŚCI OGÓLNE	54
1.1. Uwagi wstępne.....	54
1.2. Wytrzymałość powietrza w układzie o polu równomiernym	56
1.3. Wytrzymałość powietrza w układach o polu nierównomiernym.....	57
2. POMIARY	61
2.1. Badanie wytrzymałości statycznej powietrza w układach o różnych kształtach elektrod przy napięciu przemiennym	61
2.2. Badanie wytrzymałości powietrza w układach o różnych kształtach elektrod przy napięciu stałym	64
3. UWAGI I WNIOSKI	65
ĆWICZENIE 2. WYZNACZANIE ROZKŁADU NAPIĘĆ I NAPRĘŻEŃ W UKŁADACH IZOLACYJNYCH	66
1. WIADOMOŚCI OGÓLNE	66
1.1. Rozkład naprężeń w układzie płaskim uwarstwionym szeregowo	69
1.2. Rozkład napięcia wzdłuż łańcucha izolatorów	70
1.3. Rozkład napięcia wzdłuż powierzchni izolatora wsporczego.....	75
2. POMIARY	75
2.1. Pomiar rozkładu napięcia w układzie płaskim uwarstwionym szeregowo	75
2.2. Pomiar rozkładu napięcia wzdłuż łańcucha izolatorów	77
2.3. Wyznaczenie obrazu pola elektrycznego.....	78
2.3.1. Wyznaczenie obrazu pola elektrycznego przy użyciu papieru słabo przewodzącego.....	78
2.3.2. Wyznaczenie obrazu pola elektrycznego na komputerze przy użyciu programu Quick-Field.....	79
3. UWAGI I WNIOSKI	79
ĆWICZENIE 3. BADANIE IZOLATORÓW	80
1. WIADOMOŚCI OGÓLNE	80
1.1. Klasyfikacja izolatorów	80
1.2. Wymagania stawiane izolatorom.....	82
1.3. Materiały stosowane do produkcji izolatorów	88
1.4. Konstrukcje izolatorów.....	92
2. POMIARY	103
2.1. Pomiar napięcia przeskoku na sucho	103
2.2. Próba napięciowa.....	104



2.3. Pomiar długości dróg przeskoku	104
2.4. Dobór izolatorów do warunków środowiskowych	106
3. UWAGI I WNIOSKI	107
ĆWICZENIE 4. WYTRZYMAŁOŚĆ UDAROWA UKŁADÓW ELEKTRYCZNYCH W POWIETRZU I PODSTAWY KOORDYNACJI IZOLACJI	108
1. WIADOMOŚCI OGÓLNE	108
1.1. Charakterystyka udarowa	108
1.2. Zasady koordynacji izolacji	112
1.3. Współczynnik udaru	114
2. POMIARY	115
2.1. Sprawdzenie kształtu udaru i stabilności działania generatora udarów piorunowych	115
2.2. Sprawdzenie prawidłowości kształtu charakterystyk udarowych obiektu chronionego	116
2.3. Określenie odstepu elektrod iskiernika chroniącego zapewniającego właściwą ochronę obiektu chronionego	117
2.4. Wyznaczenie krzywych prawdopodobieństwa przeskoku układu ostrze - płyta	118
2.6. Pomiar statycznego napięcia przeskoku	120
3. UWAGI I WNIOSKI	121
ĆWICZENIE 5. BADANIE DIELEKTRYKÓW PŁYNNYCH I STAŁYCH	122
1. WIADOMOŚCI OGÓLNE	122
1.1. Przewodność czynna dielektryków	122
1.2. Mechanizm pojawiania się napięcia powrotnego	122
1.3. Przebieg dielektryków ciekłych	124
1.3.1. Rodzaje dielektryków ciekłych	124
1.3.2. Mechanizm przebiegu dielektryków ciekłych	125
1.3.3. Wpływ różnych czynników na wytrzymałość olejów	125
1.4. Współpraca olejów z dielektrykami stałymi	127
1.5. Przebieg dielektryków stałych	128
2. POMIARY	132
2.1. Pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej, metodą samorozładowania, izolacji papierowej impregnowanej	132
2.2. Charakterystyka czasowa zmian napięcia pojawiającego się na zaciskach kondensatora po jego uprzednim bezrezystancyjnym rozładowaniu	134
2.3. Wyznaczenie charakterystyki wytrzymałości papieru kablowego w funkcji liczby warstw papieru	135



2.4. Porównanie wytrzymałości elektrycznej oleju zawilgoconego i niezawilgoconego	136
2.5. Stwierdzenie wpływu przegród na zwiększenie wytrzymałości elektrycznej oleju zawilgoconego	137
2.6. Wizualne stwierdzenie tworzenia się w polu elektrycznym w oleju izolacyjnym mostków przewodzących ułatwiających przebicie oleju	138
3. UWAGI I WNIOSKI	138
ĆWICZENIE 6. BADANIE PRZEBIEGÓW FALOWYCH W LINIACH DŁUGICH	139
1. WIADOMOŚCI OGÓLNE	139
1.1. Uwagi wstępne	139
1.2. Określenie kształtu fal za pomocą oscyloskopu	142
1.3. Przejście fali prostokątnej z linii o impedancji falowej Z_1 na linię o impedancji falowej Z_2	143
1.4. Odpowiedź węzła obciążonego stałymi skupionymi i zaatakowanego przez falę prostokątną	146
1.5. Trafienie fali prostokątnej na pojemność skupioną włączoną między przewód a ziemię	147
1.6. Przebiegi falowe wywołane falami prostokątnymi o stosunkowo małej długości	151
1.7. Przejście fali przez dławik włączony szeregowo do linii	152
1.8. Trafienie fali na obwód drgający LC	155
1.9. Eliminacja impedancji falowej	157
1.10. Dopasowanie rezystancji wyjściowej generatora do impedancji falowej kabla	160
2. POMIARY	163
2.1. Dopasowanie rezystancji wyjściowej generatora do impedancji falowej kabla	163
2.2. Określenie impedancji linii długiej	163
2.3. Rejestracja zjawisk falowych w linii długiej przy przejściu fali z linii o impedancji falowej Z_1 na linię o impedancji falowej Z_2	164
2.4. Eliminacja impedancji falowej	165
2.5. Trafienie fali na pojemność skupioną	165
2.6. Trafienie fali na indukcyjność skupioną	166
2.7. Trafienie fali prostokątnej na obwód drgający LC	167
3. UWAGI I WNIOSKI	167
ĆWICZENIE 7. WYZNACZANIE ROZKŁADU NAPIĘĆ W UZWOJENIU TRANSFORMATORA PRZY NAPIĘCIU UDAROWYM	168
1. WIADOMOŚCI OGÓLNE	168
1.1. Schemat zastępczy uzwojenia transformatora	168



1.2. Chwilowy rozkład napięcia. Oscylogram napięcia	168
1.3. Metoda wyznaczania chwilowego rozkładu napięcia. Obwiednia przepięć	170
1.4. Rozkład początkowy i końcowy	171
1.5. Doświadczalny sposób wyznaczania rozkładu początkowego	173
1.6. Przybliżona metoda wyznaczania obwiedni drgań	174
1.7. Przepięcia udarowe w uzwojeniu wtórnym	176
1.8. Przepięcia w autotransformatorach	179
1.9. Sposoby poprawiania rozkładu początkowego w uzwojeniach transformatorów (metody wyrównania rozkładu początkowego)	182
1.10. Przepięcia międzycewkowe	184
2. POMIARY	187
2.1. Pomiar rozkładu napięcia na modelu uzwojenia transformatora	187
2.2. Wyznaczanie przekładni elektrostatycznej	189
2.3. Ocena oscylogramów przebiegów napięciowych w uzwojeniu wtórnym	190
2.4. Pomiar rozkładu napięcia na modelu uzwojenia autotransformatora	191
2.5. Pomiar rozkładu napięcia z zastosowaniem ekranowania uzwojenia	192
2.6. Pomiar przepięć międzycewkowych	192
3. UWAGI I WNIOSKI	193
ĆWICZENIE 8. BADANIE ODGROMNIKA ZAWOROWEGO	194
1. WIADOMOŚCI OGÓLNE	194
1.1. Wstęp	194
1.2. Odgromnik zaworowy	195
1.2.1. Iskiernik wielokrotny	195
1.2.2. Stos zmienneoporowy	198
1.2.3. Działanie ochronne odgromnika zaworowego	201
1.2.4. Napięcie znamionowe odgromnika zaworowego	203
1.2.5. Poziom ochrony odgromnika zaworowego	204
1.2.6. Próby profilaktyczne odgromnika zaworowego	205
1.3. Odgromnik beziskiernikowy	206
1.3.1. Budowa i zasada działania	206
1.3.2. Podstawowe parametry odgromników MO	208
1.3.3. Dobór odgromnika beziskiernikowego	211
1.3.4. Przykład doboru napięcia U_c	212
1.3.5. Strefa ochronna odgromników	213
2. POMIARY	215
2.1. Wyznaczenie charakterystyki prądowo-napięciowej	215
2.2. Pomiar statycznego napięcia zapłonu odgromnika zaworowego	216
2.3. Pomiar prądu upływu odgromnika zaworowego	217
2.4. Pomiar napięcia obniżonego odgromnika zaworowego	218
2.5. Dobór parametrów odgromnika MO	219
3. UWAGI I WNIOSKI	219



ĆWICZENIE 9. KOMPENSACJA PRĄDÓW ZIEMNOZWARCIOWYCH	220
1. WIADOMOŚCI OGÓLNE	220
1.1. Wstęp	220
1.2. Uwagi ogólne o niesymetrycznych zwarciach doziemnych	221
1.3. Punkt gwiazdowy uziemiony bezpośrednio lub przez impedancję	223
1.4. Punkt gwiazdowy izolowany	224
1.5. Kompensacja prądu zwarcia doziemnego	225
1.6. Metody kompensacji prądów zwarcia doziemnego	227
1.7. Eksploatacja układów elektroenergetycznych z kompensacją prądu zwarcia doziemnego	229
1.8. Prąd resztkowy i krotność przepięć w układach z kompensacją prądu zwarcia doziemnego	229
1.9. Uwagi o eksploatacji cewek kompensujących	230
1.10. Uwagi końcowe	231
2. POMIARY	232
2.1. Pomiar przepięć ustalonych i prądów zwarcia w układzie z izolowanym punktem gwiazdowym oraz kompensacja prądu zwarcia doziemnego przy pomocy cewki gaszącej	232
3. UWAGI I WNIOSKI	234
ĆWICZENIE 10. PRZEPIĘCIA FERROREZONANSOWE	235
1. WIADOMOŚCI OGÓLNE	235
2. POMIARY	242
2.1. Badanie zjawiska przewrotu w układzie trójfazowym	242
3. UWAGI I WNIOSKI	243
ĆWICZENIE 11. WYŁADOWANIA NIEZUPEŁNE	244
1. WIADOMOŚCI OGÓLNE	244
1.1. Pojęcia podstawowe	244
1.2. Oddziaływanie wyładowań niezupełnych na izolację	245
1.3. Charakterystyka poszczególnych form wyładowań niezupełnych oraz sposoby zapobiegania im	246
1.3.1. Ulot	246
1.3.2. Wyładowania ślizgowe	247
1.3.3. Wyładowania wewnętrzne	249
2. POMIARY	251
2.1. Pomiar progu jonizacji	251
2.1.1. Pomiar progu jonizacji metodą oscylograficzną	251
2.1.2. Pomiar progu jonizacji przy użyciu mostka Scheringa	252
2.2. Pomiar napięcia początkowego wyładowań ślizgowych	253



2.2.1. Układ płaski	253
2.2.2. Izolator przepustowy.....	254
3. UWAGI I WNIOSKI.....	254
LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA	255



PRZEDMOWA

Skrypt przeznaczony jest dla studentów studium dziennego, wieczorowego i zaocznego Wydziału Elektrotechniki i Elektroniki PŁ. Zawiera on objaśnienia do ćwiczeń laboratoryjnych z Inżynierii Wysokonapięciowej, prowadzonych przez Zakład Wysokich Napięć Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej.

Skrypt został podzielony na dwie części. W części pierwszej podano opis wyposażenia laboratorium wysokich napięć, zasady działania podstawowych przyrządów i układów pomiarowych oraz sposób matematycznego opracowania wyników doświadczeń. Część druga zawiera szczegółowy opis ćwiczeń.



CZĘŚĆ I

WYTWARZANIE WYSOKICH NAPIĘĆ PROBIERCZYCH I PRĄDÓW UDAROWYCH W LABORATORIACH WYSOKICH NAPIĘĆ. PRZYZRZĄDY I METODY POMIAROWE



WSTĘP

Do prawidłowego projektowania, budowy i eksploatacji linii elektroenergetycznych, maszyn, transformatorów i aparatów elektrycznych niezbędne są próby i badania wytrzymałości elektrycznej izolacji tych urządzeń oraz badanie wpływu różnego rodzaju przepięć na izolację, a także badanie przyrządów i układów ochrony izolacji od tych przepięć. Do wykonywania tego rodzaju prób niezbędne jest wyposażenie laboratoriów wysokich napięć w odpowiednie urządzenia do wytwarzania różnego rodzaju napięć i prądów oraz odpowiednią aparaturę pomiarową. Do podstawowego wyposażenia należą urządzenia do wytwarzania napięcia przemiennego o częstotliwości technicznej, napięcia stałego, napięcia udarowego i prądu udarowego.

Urządzenia do wytwarzania napięć przemiennych o częstotliwości technicznej służą do prób izolacji urządzeń wysokonapięciowych, jak również do zasilania generatorów napięcia i prądu udarowego, generatorów napięcia wielkiej częstotliwości oraz źródeł napięcia stałego. Urządzenia te umożliwiają badanie wytrzymałości elektrycznej izolacji urządzeń w różnych warunkach eksploatacyjnych.

Urządzenia do wytwarzania napięcia stałego stosowane są do badań prób izolacji urządzeń elektrycznych napięcia stałego oraz do prób kabli elektroenergetycznych, odgromników itp.

Urządzenia do wytwarzania napięć i prądów udarowych wykorzystuje się do prób izolacji urządzeń elektrycznych i do badania zjawisk fizycznych występujących przy wyładowaniach udarowych. Urządzenia te wytwarzają w warunkach laboratoryjnych wysokie napięcie i prądy udarowe odwzorowujące napięcia i prądy wyładowań atmosferycznych.

Do pomiaru napięć i prądów w laboratoriach wysokich napięć stosuje się różnego rodzaju metody i aparaturę pomiarową. Z podstawowych przyrządów pomiarowych należy wymienić iskierniki kulowe, woltomierze elektrostatyczne, mierniki wartości szczytowej. Uniwersalnym przyrządem pomiarowym jest wysokonapięciowy oscyloskop katodowy. W układach pomiarowych wysokich napięć i prądów, różnego rodzaju mierniki włączone są najczęściej za pomocą dzielników napięcia i boczników prądowych. Bardzo użytecznym przyrządem do badania dielektryków jest wysokonapięciowy mostek Scheringa.



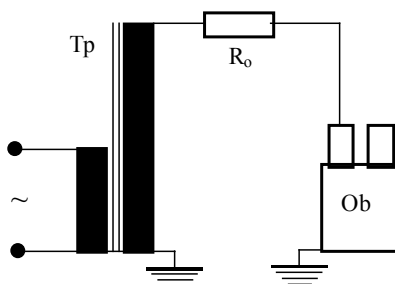
1. WYTWARZANIE WYSOKICH NAPIĘĆ PROBIERCZYCH I PRĄDÓW UDAROWYCH

1.1. Wytwarzanie wysokiego napięcia przemiennego o częstotliwości technicznej

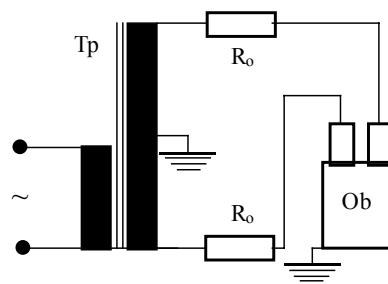
Wysokie napięcia probiercze o częstotliwości 50 Hz wytwarza się w laboratoriach za pomocą transformatorów probierczych. Są to na ogół transformatory jednofazowe, ponieważ większość prób dotyczy izolacji doziemnej. Transformator probierczy różni się od transformatora elektroenergetycznego znacznie większą przekładnią i znacznie mniejszą mocą, a także mniejszym zapasem wytrzymałości elektrycznej izolacji, co jest wynikiem specyficznych warunków pracy tego transformatora. Ze względu na sposób wykonania izolacji stosowane są dwie konstrukcyjne odmiany transformatorów probierczych:

- a) transformatory olejowe
- b) transformatory suche.

Głównymi elementami transformatora probierczego olejowego są: rdzeń magnetyczny, uzwojenia niskonapięciowe i uzwojenie wysokonapięciowe umieszczone w szczelnej kadzi, na ogół metalowej, wypełnionej olejem. Transformator może być wykonany z dwoma lub jednym zaciskiem wysokonapięciowym. Transformator z jednym zaciskiem wysokonapięciowym (rys.1) (drugi zacisk uzwojenia wysokiego napięcia jest uziemiony) tworzy układ niesymetryczny i jest stosowany do badania izolacji urządzeń elektrycznych względem ziemi. Natomiast transformatory o dwóch zaciskach wysokonapięciowych (rys. 2) z uziemionym środkiem uzwojenia wysokiego napięcia tworzy układ symetryczny i jest wykorzystany do badania izolacji międzyfazowej.



Rys. 1. Schemat układu probierczego do prób izolacji doziemnej – układ niesymetryczny. T_p – transformator probierczy, R_o – rezystor tłumiący, Ob – obiekt badany



Rys. 2. Schemat układu probierczego do prób izolacji międzyfazowej – układ symetryczny. Oznaczenia jak na rys. 1.

Obudowa transformatora olejowego może być wykonana także z materiału izolacyjnego, np. z porcelany lub rury z papieru bakelizowanego. Obudowa izolacyjna pozwala na znaczne zmniejszenie wymiarów transformatora i jego masy ze względu na uproszczenie układu izolacyjnego wyprowadzenia zacisków uzwojeń oraz zmniejszenie objętości oleju, podczas gdy w przypadku kadzi metalowej zaciski uzwojeń wyprowadzone muszą być poprzez izolatory przepustowe o odpowiednio dużych wymiarach.

Transformator olejowy charakteryzuje się niewielką w porównaniu z transformatorem suchym reaktancją rozproszenia, ma także dobrze zabezpieczone uzwojenia przed wpływami zewnętrznymi i jest powszechnie stosowany w laboratoriach. Natomiast zakres stosowania transformatora suchego ze względu na wady, jakie posiada, jest znacznie ograniczony.

Poziom napięcia znamionowego pojedynczego transformatora probierczego jest ograniczony możliwościami konstrukcyjnymi. Dla wytworzenia dostatecznie wysokiego napięcia przemiennego stosuje się kilka transformatorów odpowiednio połączonych. Ten sposób wytwarzania napięcia jest technicznie uzasadniony także i dla niższych poziomów napięć. Łącząc szeregowo uzwojenia wysokonapięciowe n jednakowych transformatorów otrzymuje się przy biegu jałowym na zacisku wysokonapięciowym ostatniego transformatora n -krotnie większą wartość napięcia (n - 2,3, rzadko więcej). Transformatory te mogą być, w zależności od sposobu zasilania, różnie łączone, jednakże powszechnie jest stosowany tzw. kaskadowy układ połączeń, przedstawiony schematycznie na rys. 3 i 4.

Do prawidłowego wykonania prób izolacji wymagana jest płynna regulacja wysokiego napięcia w granicach od zera do żądanej wartości. Regulację taką realizuje się za pomocą urządzeń regulacyjnych włączonych po stronie zasilania transformatora z sieci lub przez zmianę wzbudzenia prądnicy zasilającej. Często stosowane są regulatory indukcyjne lub autotransformatorowe, unika się natomiast regulacji za pomocą rezystorów, włączanych w szereg z uzwojeniem niskiego napięcia, a to ze względu na znaczne zniekształcenie krzywej napięcia.

Transformator probierczy charakteryzowany jest przez:

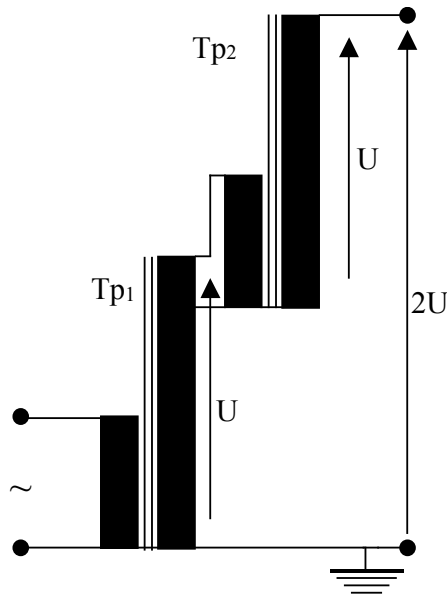
- napięcie znamionowe,
- moc znamionową,
- prąd zwarcia.

Dobór transformatora o odpowiednim napięciu znamionowym - do prób zależy od napięć probierczych badanych urządzeń. Należy zwrócić uwagę, że jeśli napięcie znamionowe transformatora jest znacznie większe od napięcia probierczego badanej izolacji, wówczas może wystąpić zniekształcenie krzywej napięcia. Dlatego też ważnych prób nie powinno się przeprowadzać przy napięciu mniejszym niż $1/3$ znamionowego napięcia transformatora probierczego.

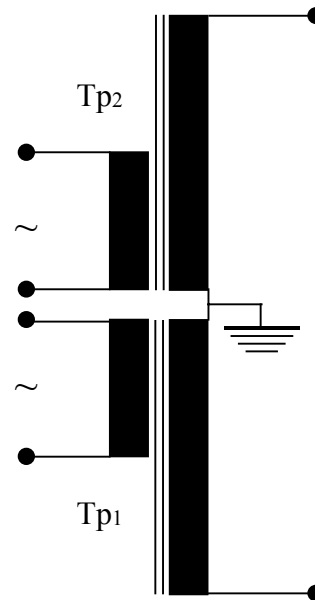
Moc znamionowa transformatora, ze względu na przerwy między pomiarami i okresy przygotowawcze oraz czas trwania prób (najczęściej 1 min), jest mocą



dorywczą najczęściej 15-minutową. Drugim ważnym parametrem zespołu probierczego, którego jeden z elementów stanowi transformator, jest moc zwarciowa niezbędna do podtrzymywania prądu wyładowania w przypadku przeskoku lub przebicia izolacji badanej. Moc ta określona jest przez napięcie probiercze oraz całkowitą impedancję zespołu probierczego.



Rys. 3. Kaskadowy układ połączeń dwóch transformatorów probierczych – układ niesymetryczny



Rys. 4. Symetryczny układ połączeń dwóch transformatorów probierczych

Prąd zwarcia transformatora zgodnie z wymaganiami przepisów wynosi 1 A dla prób izolacji na sucho i pod deszczem, a dla prób izolacji wewnętrznej, nie stykającej się z powietrzem atmosferycznym, może zawierać się w granicach od 0,1 do 1 A. Dla prób izolatorów przy sztucznym zabrudzeniu prąd zwarcia wynosi kilka amperów.

Wymagania te mają na celu upodobnienie mechanizmów przeskoku lub przebicia w laboratorium do mechanizmów, które występują w eksploatacji. W eksploatacji prądy zwarciove po przeskoku lub przebiciu izolacji osiągają rząd setek amperów, a nawet kiloamperów. Jeśli w laboratorium prąd zwarcia podczas prób jest mały, oznacza to, iż w szereg z badaną izolacją włączona jest bardzo duża indukcyjność. Wytworzenie się przeskoku lub przebicia jest w tych warunkach utrudnione i występuje przy napięciu wyższym niż w warunkach sieciowych. Minimalna wartość prądu zwarciowego wymagana jest także ze względu na możliwość stwierdzenia przeskoku lub przebicia.

W układzie probierczym pomiędzy transformator a badany obiekt włącza się rezystor tłumiący, zadaniem którego jest ograniczenie przepięć, jakie powstają w wyniku nagłego przejścia transformatora od obciążenia pojemnościowego (przed przeskokiem lub przebicciem badanej izolacji) do stanu zwarcia (po przeskoku lub przebicciu). Rezystancję przyjmuje się w granicach $5 \div 50$ omów na kilowolt napięcia probierczego. Taka wartość rezystancji tłumiącej niewiele wpływa na wartość prądu zwarcia, gdyż jej udział w impedancji zwarcia jest nieduży.

1.2. Wytwarzanie wysokiego napięcia stałego

Napięcie stałe w laboratoriach wysokich napięć wytwarza się na drodze prostowania napięcia przemiennego. Prostowanie to może być jedno- lub dwupołówkowe. Ideowy schemat układu prostowania jednapołówkowego przedstawiony jest na rys. 5. W układzie tym występuje tylko jeden prostownik, przewodzący prąd w tych półokresach, w których anoda ma dodatni potencjał względem katody. Dla uzyskania stałej wartości napięcia wyprostowanego nieodzowne jest tu zastosowanie filtra, np. w postaci kondensatora o dostatecznie dużej pojemności, włączonego równolegle z odbiornikiem. Wygładzające działanie kondensatora polega na gromadzeniu ładunku w okresie wzrostu napięcia pulsującego i oddawaniu go do odbiornika w okresie obniżania się tego napięcia.

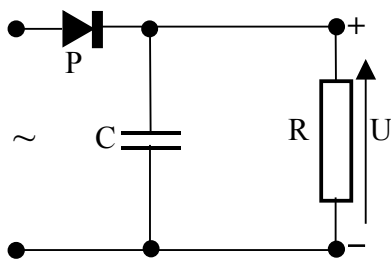
Ważnym elementem, wymagającym omówienia, jest prostownik. W układach do wytwarzania wysokiego napięcia stałego często używa się prostowniki lampowe próżniowe z żarzoną katodą, tzw. kenotrony. Kenotron jest lampą elektronową o wysokiej próżni, w której znajdują się dwie elektrody. Działanie kenotronu opiera się na zjawisku emisji termoelektrycznej z nagrzanej katody.

Włączając kenotron szeregowo w obwód źródła prądu przemiennego uzyskuje się przepływ prądu tylko w tych półokresach napięcia, w których potencjał anody jest wyższym niż potencjał katody. W pozostałych półokresach prąd w obwodzie nie płynie ponieważ wówczas kenotron działa zaporowo. W okresie nieprzewodzenia na prostowniku występuje napięcie o wartości maksymalnej równej około podwójnej wartości wytwarzanego napięcia stałego. Jest to tzw. napięcie zwrotne prostownika. Kenotrony budowane są na napięcie zwrotne w granicach do 400 kV. Tak więc za pomocą układu pokazanego na rys. 5 można uzyskać napięcie stałe o wartości nie większej niż 200 kV.

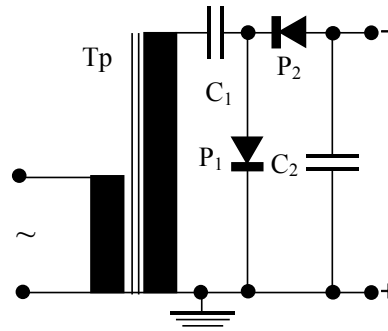
Do wytwarzania bardzo wysokich napięć stałych stosuje się różne metody, najczęściej jednak metodę powielania napięcia. Schemat ideowy układu podwajającego napięcie, wyjaśniający zasadę powielania, przedstawia rys. 6. Schemat ten, podobnie jak i schemat z rys. 5, nie uwzględnia rezystora ładującego, który w takich układach zawsze występuje. Rezystor ten wpływa między innymi na



czas ładowania kondensatorów, jednak nie wpływa na opisywany mechanizm pracy tych układów.



Rys. 5. Schemat ideowy układu do wytwarzania napięcia stałego. P – prostownik, C – kondensator, R – odbiornik



Rys. 6. Schemat ideowy układu podwajającego napięcie. T_p – transformator zasilający, P_1, P_2 – prostowniki, C_1, C_2 – kondensatory

Jeżeli napięcie po wtórnej stronie transformatora zasilającego jest dodatnie, wówczas ładowany jest kondensator C_1 , zaś kondensator C_2 jest w tym czasie odcięty od źródła zasilania (prostownik P_2 w tym czasie nie przewodzi prądu). Jeżeli napięcie po wtórnej stronie transformatora T_p jest ujemne, wówczas kondensator C_1 nie jest ładowany (prostownik P_1 w tym czasie nie przewodzi prądu), natomiast ładowany jest kondensator C_2 . Należy zwrócić uwagę, że do napięcia występującego w transformatorze T_p dodaje się napięcie występujące na zaciskach kondensatora C_1 , zwiększając wypadkowe napięcie, którym ładowany jest kondensator C_2 . Po dłuższym okresie czasu kondensator C_1 zostaje naładowany do napięcia $U = U_{TP} \sqrt{2}$ (U_{TP} - napięcie po stronie wtórnej transformatora - wartość skuteczna), zaś kondensator C_2 zostaje naładowany do napięcia $2U$. Wartości tych napięć uzyskuje się w warunkach idealnych, tzn. takich, w których nie występuje żadna upływność dielektryku kondensatorów C_1 i C_2 . W rzeczywistości dielektryki kondensatorów C_1 i C_2 mają określoną upływność, która zwłaszcza w końcowej fazie ich ładowania odgrywa istotną rolę. W związku z tym mówi się o sprawności napięciowej układu, która jest tym mniejsza, im większa jest wartość rezystancji ładującej oraz im większą upływnością charakteryzują się dielektryki kondensatorów C_1 i C_2 .

Stosując większą liczbę n kondensatorów i n prostowników można uzyskać źródło napięcia stałego powielającego n -krotnie napięcie $U = U_{TP} \sqrt{2}$. Szczegółowe rozważania analityczne rozpatrywanego układu opisane są w literaturze [1].

Współcześnie coraz większe zastosowanie znajdują prostowniki wysokiego napięcia, budowane z elementów półprzewodnikowych. Są one znacznie wygodniejsze w zastosowaniu, gdyż nie wymagają żarzenia. W przypadku

prostowników lampowych konieczny jest transformator żarzeniowy względnie akumulator do żarzenia katody. Urządzenia te muszą jednak posiadać odpowiedni poziom izolacji, tak, aby wytrzymały wysokie napięcie panujące na prostowniku. W praktyce stosowane były czasem - oprócz wymienionych powyżej - prostowniki mechaniczne.

1.3. Wytwarzanie wysokiego napięcia udarowego

1.3.1. Uwagi ogólne

Izolacja urządzeń elektroenergetycznych narażona jest na działanie bardzo dużych napięć będących wynikiem uderzenia piorunu w linię napowietrzną lub w jej pobliżu. Napięcia te mają charakter unipolarny i charakteryzują się dużymi stromościami narastania, bardzo dużymi wartościami szczytowymi i bardzo krótkimi czasami trwania, rzędu kilkudziesięciu mikrosekund.

Wytrzymałość izolacji urządzeń elektroenergetycznych zależy od wartości szczytowej i od stromości narastania napięcia udarowego, przy czym w ostatnim przypadku zagrożona jest ta część izolacji, na której przy napięciu wolnozmennym praktycznie naprężenia nie występują (np. izolacja podłużna w transformatorze). Z tego względu izolacja urządzeń elektroenergetycznych poddawana jest próbom udarowym. Istnieje zatem konieczność wytwarzania w laboratoriach wysokich napięć udarowych, które by dość wiernie imitowały fale wędrownie pochodzenia atmosferycznego.

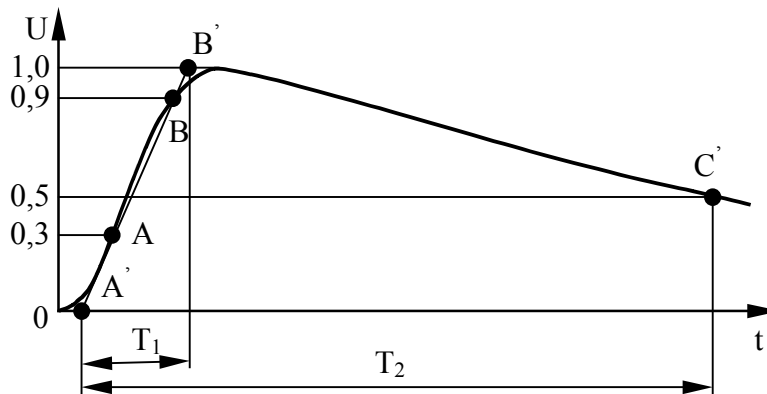
Dla jednoznacznej oceny odporności izolacji na przepięcia atmosferyczne udary napięciowe, którymi bada się izolację, zostały znormalizowane.

Według [N1] udarem napięciowym nazywa się krótkotrwały przebieg napięcia kierunkowego, które wzrasta praktycznie bez oscylacji od zera do wartości szczytowej, a następnie maleje do zera (rys. 7).

W celu określenia parametrów czasowych udaru napięciowego na podstawie oscylogramu wyznaczamy trzy punkty o współrzędnych $0,3 U$ i $0,9 U$ na czole oraz $0,5 U$ na grzbiecie. Przez punkty A i B przeprowadzamy prostą do przecięcia się z prostymi poziomymi $U = 0$ i $U = 1,0$, wyznaczając w ten sposób punkty A' i B'. Punkt A' nazywamy umownym początkiem udaru, zaś różnica odciętych punktów A' i B' jest umownym czasem trwania czoła. Różnica odciętych punktów A' C' jest umownym czasem do półszczytu.

W Polsce udarem znormalizowanym zgodnym z przepisami IEC, jest udar o parametrach $T_1 = 1,2 \mu s \pm 30\%$ i $T_2 = 50 \mu s \pm 20\%$, zapisywany w skrócie 1,2/50. Udarem o takim kształcie nazywany jest udarem napięciowym normalnym. Opisany wyżej udar napięciowy wytwarza się w laboratorium za pomocą generatora udarów napięciowych.

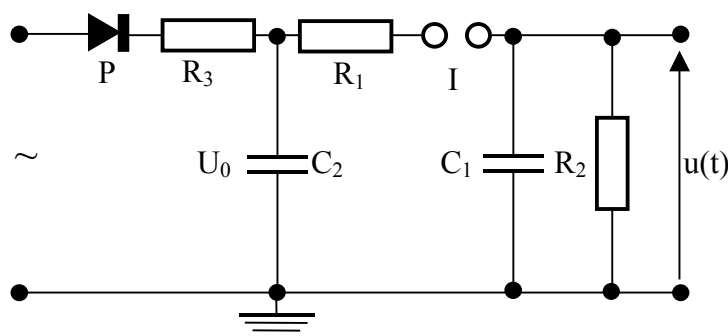




Rys. 7. Sposób określania parametrów czasowych udaru napięciowego. T_1 – czas trwania czola, T_2 – czas do półszczytu

1.3.2. Jednostopniowy generator udarów napięciowych (GUN)

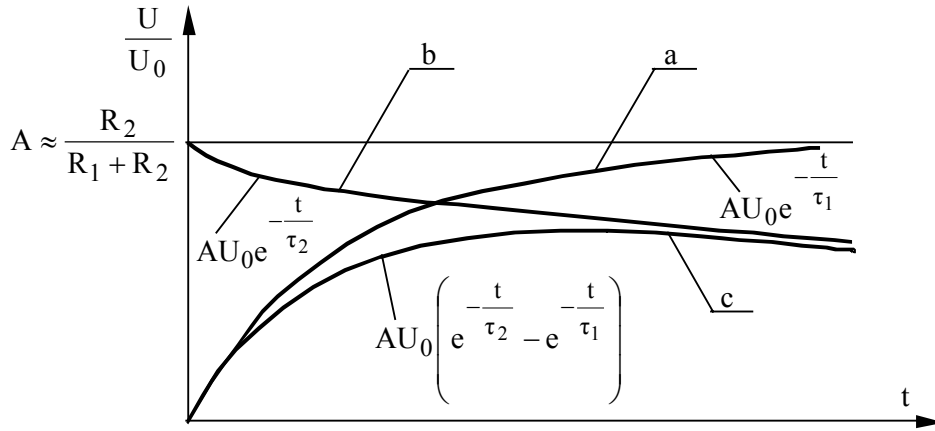
Zasadniczymi elementami generatora udarów napięciowych są kondensatory wysokonapięciowe pracujące w cyklu ładowania - rozładowania, oraz układ zasilający, złożony z transformatora, prostownika i rezystora ładującego. Zasadę działania generatora rozpatrzmy posługując się schematem zastępczym.



Rys. 8. Schemat jednostopniowego generatora udarów napięciowych. P – prostownik, R_1 – rezystor tłumiący, R_2 – rezystor rozładowujący, R_3 – rezystor ładujący, C_1 – kondensator do kształtowania czola udaru, C_2 – kondensator główny, I – iskiernik zapalający

Kondensator główny generatora C_2 jest ładowany poprzez rezystor R_3 napięciem stałym o wartości U_0 odpowiadającej napięciu przeskoku iskiernika I . Po przekroczeniu wytrzymałości iskiernika I nastąpi przeskok i ładowanie kondensatora C_1 poprzez rezystor R_1 (rys. 9, krzywa a). W tej fazie procesu następuje formowanie czola udaru. Ze względu na $R_2 \gg R_1$, czas trwania czola T_1 zależy głównie od wartości R_1 i C_1 . Jednocześnie kondensator C_2 , a także po naładowa-

niu do wartości szczytowej U_m również kondensator C_1 rozładowują się przez rezystor R_2 (rys. 9, krzywa b). W tej fazie formowany jest grzbiet udaru. Czas do półszczytu T_2 zależy przede wszystkim od wartości R_2 i C_2 , gdyż $C_2 \gg C_1$.



Rys. 9. Graficzny sposób przedstawienia formowania napięcia udarowego (krzywa c) w obwodzie podanym na rys. 8.

Łatwo uzasadnić, że przebieg zmian napięcia $u(t)$ można wyrazić wzorem:

$$u(t) = U_0 \eta_0 \left(e^{-t/\tau_2} - e^{-t/\tau_1} \right) \quad (1)$$

gdzie: τ_1, τ_2 - stałe czasu, zależne od C_1, C_2, R_1, R_2 ,
 η_0 - sprawność generatora, którą można przedstawić zależnością:

$$\eta_0 = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_1}{C_2}} \quad (2)$$

$$T_1 = k_1 \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}, \text{ gdzie } k_1 \approx 3,0 \quad (3)$$

$$T_2 \approx k_2 \frac{R_2 C_2}{\eta_0}, \text{ gdzie } k_2 \approx 0,73 \quad (4)$$

Natomiast wartość szczytową udaru można oszacować jako $U_m \approx U_0 \eta_0$.

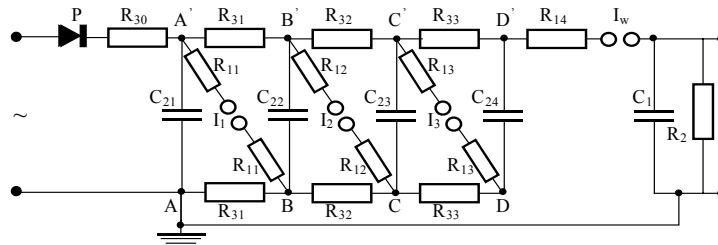
W dotychczasowych rozważaniach pominięto indukcyjność obwodu. Jej obecność w obwodzie rozładowania ma wpływ na kształt udaru. Rezystor R_1 ma za zadanie nie tylko kształtować czoło udaru, ale także wytłumiać drgania zniekształcające udar, wywołane obecnością indukcyjności. Zwykle tak dobiera się wartość tej rezystancji dla uzyskania udaru aperiodycznego, aby była spełniana zależność:

$$R_1 \geq 2\sqrt{\frac{L}{C_1 C_{21}}} \approx 2\sqrt{\frac{L}{C_1}} \quad (5)$$

Z powyższego opisu zasady działania generatora jednostopniowego wynika, że możemy uzyskać interesujący nas kształt udaru napięciowego przez odpowiednie dobranie parametrów generatora C_1 , C_2 , R_1 , i R_2 . Natomiast wartość szczytową udaru napięciowego możemy zmienić przez zmianę odstępów elektrod iskiernika I.

1.3.3. Wielostopniowy generator ударów napięciowych

W praktyce zastosowanie generatorów jednostopniowych jest ograniczone ze względu na niewielkie napięcia, jakie można za ich pomocą uzyskać (nie większe niż 400 kV). Ponieważ jednak do celów badawczych wymagane są wartości szczytowe udarów rzędu kilku megawoltów, zachodzi konieczność budowy generatorów wielostopniowych, zwielokrotniających napięcie. Działanie generatora wielostopniowego oparte jest na zasadzie jednoczesnego ładowania kondensatorów w połączeniu równoległym i rozładowaniu ich w połączeniu szeregowym. Przełączenie z układu równoległego na szeregowy realizowane jest samoczynnie poprzez zapłon iskierników międzystopniowych. Typowy schemat zastępczy wielostopniowego generatora udarów napięciowych przedstawiony jest na rys. 10.



Rys. 10. Schemat czterostopniowego generatora udarów napięciowych. C_{2k} – kondensator jednego stopnia, R_{30} – rezystor ładujący, R_{1k} – rezystor tłumiący, R_2 – rezystor rozładowujący, R_{3k} – rezystor międzystopniowy, I_k – iskiernik międzystopniowy, I_w – iskiernik włączający, ($k=1, 2, 3, 4$)

Proces wytwarzania udaru napięciowego rozpoczyna się od ładowania równolegle połączonych kondensatorów głównych $C_{21}, C_{22}, \dots$ poprzez rezystor R_{30} i rezystory międzystopniowe $R_{31}, R_{32}, \dots$, przy czym dla zapewnienia równomierności ładowania wszystkich stopni generatora dobiera się $R_{31}, R_{32}, \dots \ll R_{30}$. Po zakończeniu procesu ładowania potencjały punktów A, B, C, D są równe zero, natomiast punkty A', B', C', D uzyskują potencjały równe wartości napięcia zasilającego U. Proces rozładowania rozpoczyna się z chwilą zapłonu iskiernika I_1 . Przyjmując, że $R_{31}, R_{32}, \dots \gg R_{11}, R_{12}, \dots$, potencjał punktu B po przeskoku na I_1 wzrasta do U_0 , natomiast potencjał punktu B' do $2U_0$. Napięcie na iskierniku I_2 wzrasta do $2U_0$, powodując jego zapłon i wzrost potencjału punktu C do $2U_0$, a punktu C' do $3U_0$. Proces zapłonu pozostałych iskierników międzystopniowych i przenoszenia się potencjałów jest analogiczny, a potencjał punktu D' podnosi się do $4U_0$ (w ogólnym przypadku przy n stopniach do nU_0). Po zapłonie iskierników powstaje szeregowe połączenie kondensatorów C i zsumowanie napięć na tych kondensatorach.

Dalszy proces kształtowania udaru napięciowego przebiega analogicznie jak w generatorze jednostopniowym, ale z tą różnicą, że jako pojemność główna generatora występują teraz szeregowo połączone pojemności $C_{21}, C_{22}, \dots$ wszystkich stopni, czyli

$$C_2 = \frac{1}{\sum \frac{1}{C_{2k}}} \quad (6)$$

a rezystancja tłumiąca jest sumą $R_{11} + R_{12} + \dots$

1.4. Wytwarzanie prądu udarowego

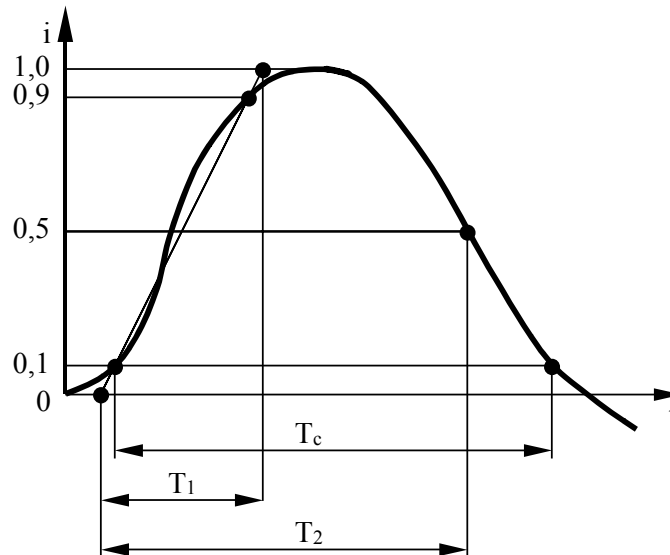
1.4.1. Uwagi ogólne

Urządzenia elektroenergetyczne narażone są na oddziaływanie lub przepływ przez nie krótkotrwałych prądów o bardzo dużych wartościach, których źródłem są wyładowania atmosferyczne. Przebieg czasowy prądu piorunu ma charakter udarowy i swym kształtem przypomina przebieg czasowy znanego już nam udaru napięciowego. Wartości szczytowe prądu piorunu zawierają się w granicach od kilku do kilkudziesięciu a nawet setek kiloamperów, a czas ich trwania wynosi kilkadziesiąt mikrosekund. W laboratoriach wysokich napięć do celów badawczych konieczne jest wytwarzanie prądów udarowych imitujących prądy piorunu. W praktyce prądy udarowe najczęściej wykorzystuje się do badania



odgromników, elementów izolacji, przewodów, a także do badania mechanizmu wyładowań przy dużych wartościach szczytowych prądu,

Współcześnie prądy udarowe o bardzo dużych stromościach (rzędu ns) i wartościach szczytowych (rzędu MA) znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach techniki. Na przykład są wykorzystywane do wytwarzania błysków świetlnych o dużej mocy, do wytwarzania fal uderzeniowych stosowanych do plastycznego kształtowania metali, kruszenia ciał twardych itp. Są one stosowane także w technice laserowej, w technice jądrowej, w chemii radiacyjnej i w wielu innych dziedzinach.



Rys. 11. Sposób określania parametrów czasowych udaru prądowego. T_1 – czas trwania czoła, T_2 – czas do półszczytu, T_c – całkowity czas trwania udaru

Podobnie jak udary napięciowe, również i udary prądowe stosowane do prób w laboratorium mają kształt ściśle określony [N1]. Według wyżej wymienionej normy udar prądowy jest krótkotrwałym przebiegiem prądu praktycznie jednokierunkowego, który wzrasta bez znacznych oscylacji od zera do wartości szczytowej, a następnie maleje do zera. Prócz wartości szczytowej udar prądowy charakteryzują parametry czasowe, które można określić na podstawie oscylogramu (rys.11). T_1 oznacza czas trwania czoła, T_2 - czas do półszczytu, a T_c - całkowity czas trwania udaru prądowego. Do prób stosuje się udary o jednym z następujących kształtów:

udar prądowy o $T_1 = 8\mu s \pm 10\%$ i $T_2 = 20\mu s \pm 10\%$

oznaczony jako udar 8/20

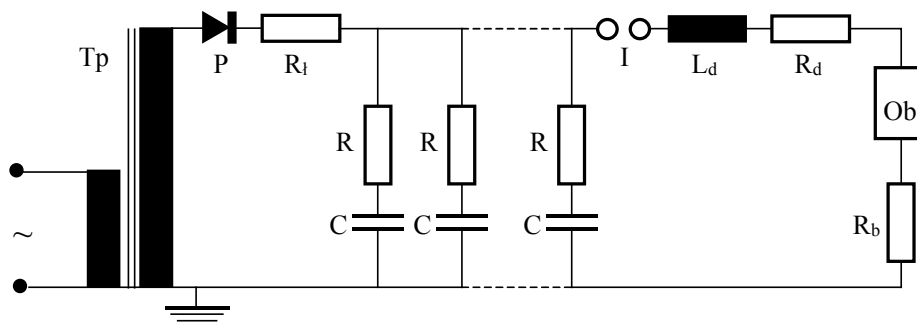
udar prądowy o $T_1 = 4\mu s \pm 10\%$ i $T_2 = 10\mu s \pm 10\%$

oznaczamy jako udar 4/10.

Udary o tak określonych kształtach nazywane są udarami prądowymi normalnymi. Ponadto do badań bywają czasami stosowane udary prądowe prostokątne, zespolowe oraz specjalne. W laboratorium prądy udarowe wytwarza się za pomocą generatorów prądowych.

1.4.2. Generator udarów prądowych (GUP)

Zasadnicze elementy generatora udarów prądowych - to układ zasilający, bateria kondensatorów i obwód zewnętrzny (rys. 12).



Rys. 12. Schemat generatora udarów prądowych. T_p – transformator zasilający, P – prostownik, R_l – rezystor ładujący, R – rezystory ograniczające, C – kondensatory, I – iskiernik, R_d – rezystor dodatkowy, R_b – bocznic prądowy, Ob – obiekt badany

Zasada działania generatora udarów prądowych jest następująca: bateria kondensatorów ładowana jest przez rezystor ładujący do napięcia U_0 , ograniczonego wytrzymałością przerwy iskiernika włączającego. Po zapłonie iskiernika następuje rozładowanie baterii kondensatorów przez obwód zewnętrzny prądowy. Schemat zastępczy obwodu rozładowania (rys.13) składa się z pojemności równolegle połączonych kondensatorów nC , indukcyjności L i rezystancji R szeregowo połączonych elementów obwodu rozładowania. Jak wiadomo, w obwodzie takim prąd rozładowania może mieć przebieg oscylacyjny lub aperiodyczny.

Dla $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ prąd ma przebieg tłumionych drgań i może być wyrażony wzorem:

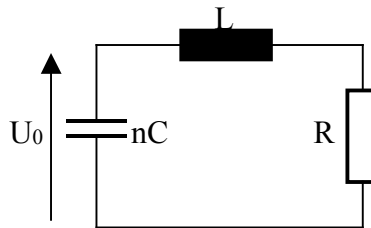
$$i = \frac{U_0}{\omega L} e^{-\alpha t} \sin \omega t \quad (7)$$

$$\text{gdzie: } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \alpha = \frac{R}{2L}.$$

Przy $R \rightarrow 0$ wartość szczytowa prądu będzie równa:

$$I_{\max} = U_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (8)$$

Natomiast dla $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ przebieg prądu jest aperiodyczny, a jego wartość jest znacznie mniejsza.



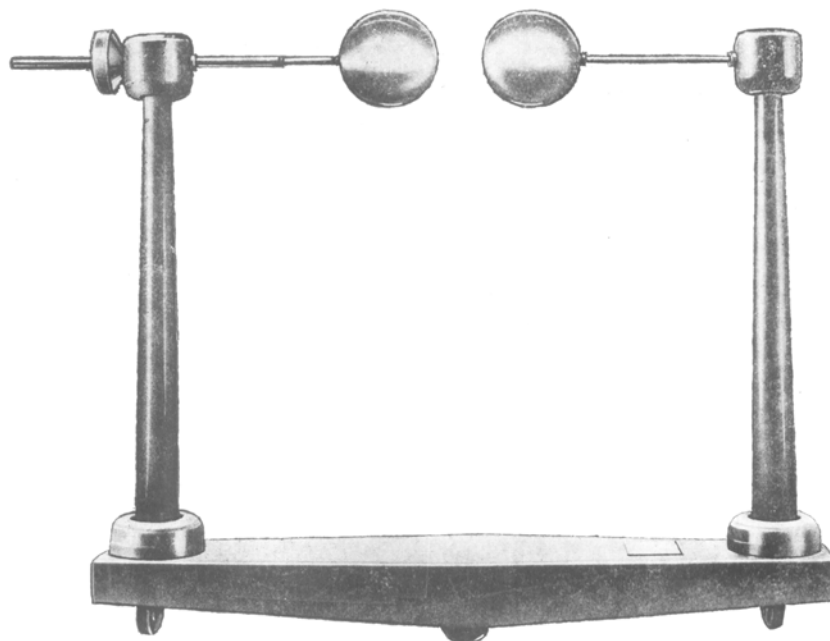
Rys. 13. Schemat zastępczy generatora udarów prądowych

Jak wynika z powyższego, wartość szczytowa prądu udarowego zależy od pojemności, indukcyjności i rezystancji. Dla uzyskania dużych prądów należy więc zwiększyć pojemność i ograniczać indukcyjność obwodu. To ostatnie wymaganie sprowadza się do skrócenia i odpowiedniego wykonania połączeń, co można uzyskać np. ustawiając baterię kondensatorów na obwodzie koła z iskiernikiem włączającym i obiektem w środku tego koła.

2. PRZYZRZĄDY I METODY POMIAROWE W LABORATORIACH WYSOKICH NAPIĘĆ

2.1. Iskiernik kulowy

Iskierniki kulowe znajdują powszechne zastosowanie w pomiarach wartości szczytowej wysokich napięć przemiennych, stałych i udarowych.



Rys. 14. Iskiernik pomiarowy z kulami usytuowanymi poziomo

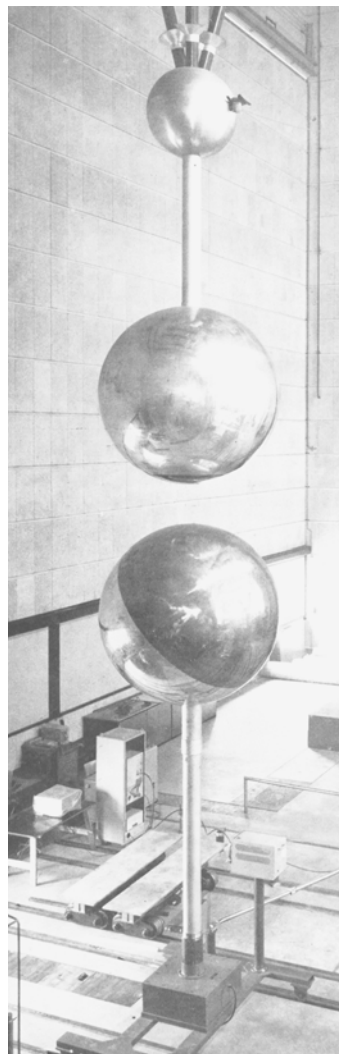
Odznaczają się one prostą konstrukcją oraz łatwością dokonywania pomiaru. Iskiernik pomiarowy posiada dwie jednakowe kule wykonane najczęściej z miedzi lub mosiądzu. Są one usytuowane poziomo przy średnicach kul ≤ 250 mm (rys.14) lub pionowo - (rys.15). Pomiaru dokonuje się albo przez podnoszenie napięcia przy stałej odległości elektrod lub zmniejszając odstęp elektrod przy ustalonej wartości napięcia. Napięcie przeskoku pomiędzy kulami w powietrzu przy tych samych warunkach zewnętrznych zależy od odległości pomiędzy kulami a i od średnicy kul D oraz od sposobu ich przyłączenia. Napięcie można doprowadzić symetrycznie lub niesymetrycznie (jedna z kul uziemiona). W za-

leżności od sposobu położenia osi iskiernika i przyłączenia przy tych samych odstępach kul między jednakowymi kulami otrzymuje się różne wartości napięcia przeskoku. Napięcie przeskoku iskiernika o jednej kuli uziemionej zależy również od biegunowości potencjału panującego na kuli nieuziemionej, co jest bardzo ważne podczas pomiarów napięć udarowych. W praktyce pomiarowej korzystamy z tablic zamieszczonych w normie [N2], w których podane jest napięcie przeskoku w zależności od odstępów a , średnicy kul D oraz biegunowości przy normalnych warunkach atmosferycznych $T = 293 \text{ K}$ ($t = 20^\circ\text{C}$) $b = 1013 \text{ hPa}$ (760 mm Hg) dla:

- napięć zmiennych małej częstotliwości (50Hz),
- napięć udarowych obu biegunowości.

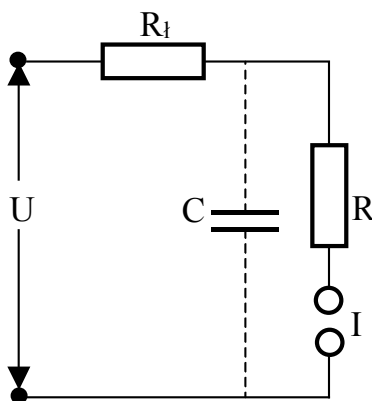
Norma ta podaje także, w jaki sposób uwzględnia się wpływ takich czynników, jak ciśnienie, temperatura i wilgotność powietrza. Pomiar napięć udarowych iskiernikiem kulowym ma wiele cech szczególnych wynikających z krótkiego czasu działania udaru napięcia na przerwę.

W pomiarach wartości szczytowej przebiegów udarowych za napięcie przeskoku przyjmuje się napięcie, przy którym połowa ze wszystkich udarów doprowadzonych do badanego obiektu wywołuje przeskok i nazywa się pięćdziesięcioprocentowym napięciem przeskoku. W celu zapewnienia niezawodności pomiaru napięć udarowych iskiernikami kulowymi, często stosuje się sztuczną jonizację przerwy iskrowej przez naświetlanie jej promieniami ultrafioletowymi lampy kwarcowej lub preparatami promieniotwórczymi. Należy także pamiętać, że na dokładność pomiarów mają wpływ obiekty postronne znajdujące się w pobliżu iskiernika kulowego. Podczas pomiarów iskiernikiem kulowym często stosuje się zabezpieczenie źródła



Rys. 15. Iskiernik pomiarowy z kulami usytuowanymi pionowo

prądu przemiennego wysokiego napięcia przed skutkami krótkotrwałych zwarć i przepięć za pomocą szeregowo włączonych rezystorów ochronnych, ograniczających prąd w obwodzie i chroniących kule iskiernika przed nadtopieniem. Ochrona źródła i kul iskiernika jest bardziej skuteczna przy dużej rezystancji. Jednakże spadki napięciowe na rezystorze od prądów pojemnościowych w iskierniku przed zapłonem groziłyby poważnymi uchybami pomiarów, jeśli rezystancja byłaby dość duża. Najczęściej układ połączeń iskiernika kulowego oraz obiektu jest taki, jak przedstawiono na rys. 16.



Rys. 16. Współpraca iskiernika pomiarowego z rezystorem szeregowym. R_t – rezystor ochronny, R – rezystor tłumiący zespołu probierczego, I – iskiernik pomiarowy

W celu ograniczenia prądów pojemnościowych przepływających przez rezystor szeregowy należy umieszczać go jak najbliżej iskiernika pomiarowego aby wyeliminować udział pojemności przewodów doprowadzających. Wartość rezystancji w zależności od średnicy kul określa norma [N2]. Podczas pomiarów napięć udarowych niebezpieczeństwo uchybu pomiaru od spadku napięciowego na rezystorze szeregowym jest znacznie większe i dlatego zaleca się go unikać, jednakże z ostrożnością można stosować rezystancję kilkuset omów. Pozwala ona na stłumienie oscylacji wywołanych zapłonem iskiernika. Należy jednak pamiętać, że stała czasowa układu rezystor tłumiący - pojemność iskiernika musi być mniejsza od czasu narastania mierzonego napięcia.

Przed przystąpieniem do pomiarów należy sprawdzić czy powierzchnia iskiernika jest gładka i czysta. Głównie chodzi tu o zanieczyszczenie cząsteczkami kurzu.

Przed właściwym pomiarem dobrze jest wykonać kilka wstępnych przeskoków. Dokładność pomiaru iskiernikiem kulowym wynosi $\pm 3\%$, przy odstępach elektrod spełniającym warunek :

$$a \leq 0,5D \text{ i } \pm 5\% \text{ dla } 0,5D < a < 0,8D.$$

Do wad iskierników kulowych należą:

- ograniczenie zakresu pomiarowego tylko do wartości szczytowej napięć,
- niemożność zmierzenia nimi wartości szczytowej przebiegów nie powtarzających się,
- niemożność dokładnego pomiaru wartości szczytowej udarów o czasie trwania do półszczytu $2\div 3 \mu s$,
- konieczność doprowadzenia do wyładowania iskrowego, powodującego powstawanie przepięć i innych zakłóceń w układzie pomiarowym,
- znaczny rozrzut wartości mierzonej w następujących po sobie pomiarach; konieczność wykonywania kilku serii pomiarów i porzucenia na średniej arytmetycznej.

Zaletą natomiast jest prosta konstrukcja i praktycznie nieograniczony górny zakres mierzonych napięć.

Tabela 1. Średnice kul stosowane do pomiarów w zależności od wielkości napięcia.

Średnica kul [cm]	2	5	10	25	50	100	150	200
Największa wartość napięcia mierzonego [kV]	40	90	170	380	720	1400	2000	2700

W tabeli 1 są podane największe wartości tych napięć, jakie można pomierzyć przy różnych średnicach kul. W tych zakresach można zapewnić mniej więcej jednorodny rozkład pola i uniknąć zbyt silnego wpływu na pomiar przedmiotów postronnych. Przy polach niejednorodnych przeskok iskry jest poprzedzony wyładowaniami niepełnymi, a granica przeskoku jest bardzo „kapryśna” i mniej odpowiednia do celów pomiarowych.

Nierównomierność pola w iskierniku kulowym charakteryzowana jest przez współczynnik β . Największe natężenie pola E_m określa się napięciem U i odstępem między kulami a - według wzoru:

$$E_m = \frac{U}{a} \beta \left(\frac{a}{r} \right) \quad (9)$$

gdzie: β - współczynnik niejednorodności pola elektrycznego,
 r - promień kuli.

Zastosowanie zbyt wielkich kul dla stosunkowo małych napięć (małych przerw iskrowych) grozi niedostateczną dokładnością pomiaru przerwy iskrowej.

Przemawia to za ograniczeniem stosunku $\frac{a}{r}$ od dołu. Praktycznie nie powinien on być mniejszy niż $0,02\div 0,05$.



Tabela 2 podaje wartości współczynnika β w funkcji stosunku $\frac{a}{r}$.

Tabela 2. Współczynniki niejednostajności pola układu kulowego

$\frac{a}{r}$	Współczynniki niejednostajności pola	
	układu kul izolowanych, obliczone i zmierzone β_s	jednej kuli uziemionej, zmierzone β_z
0,1	1,03	1,03
0,2	1,06	1,06
0,4	1,14	1,14
0,6	1,215	1,22
0,8	1,29	1,31
1,0	1,366	1,41
1,2	1,44	1,51
1,4	1,52	1,62
1,6	1,61	1,73
1,8	1,69	1,85
2,0	1,78	1,97

2.2. Woltomierz elektrostatyczny

W najprostszym wykonaniu woltomierz elektrostatyczny przedstawia sobą kondensator, w którym jedna z elektrod jest ruchoma. Pod wpływem mierzonego napięcia między ruchomą a nieruchomą elektrodą powstają siły działające w kierunku zmiany pojemności tego układu. Miarą napięcia doprowadzonego jest przesunięcie się elektrody ruchomej względem elektrody nieruchomej.

Praca wykonana przez elektrodę równoważna jest przyrostowi energii układu wskutek zmiany jego pojemności. Oznaczając przez F siłę działającą na elektrodę ruchomą, przez U - napięcie mierzone, a przez dC - zmianę pojemności, otrzymujemy:

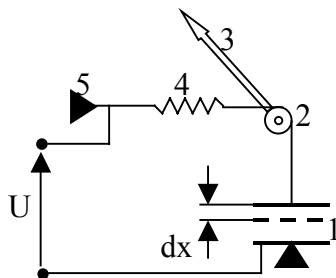
$$F = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{dx} \quad (10)$$

Jeśli elektroda ruchoma wykonuje ruch obrotowy, to moment obrotu tej elektrody można obliczyć ze wzoru:

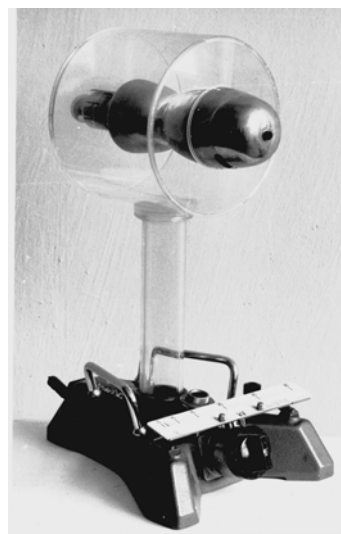


$$M = \frac{1}{2} u^2 \frac{dC}{d\alpha} \quad (11)$$

gdzie: α - kąt obrotu organu ruchomego.



Rys.17. Woltomierz elektrostatyczny. 1 – kondensator o ruchomej elektrodzie, 2 – kółko ruchome, 3 – wskazówka, 4 – sprężyna, 5 – mocowanie stałe



Rys.18. Woltomierz elektrostatyczny produkcji szwajcarskiej o zakresie 60 kV

Jak widać z tych wzorów, wskazania woltomierza elektrostatycznego są proporcjonalne do kwadratu wartości chwilowej napięcia. Stąd wynika, że nie zależą od biegunowości napięcia, a zatem woltomierz elektrostatyczny może być użyty zarówno do pomiaru napięć stałych, jak i przemiennych. Przy napięciach przemiennych woltomierz elektrostatyczny mierzy wartość skuteczną napięcia.

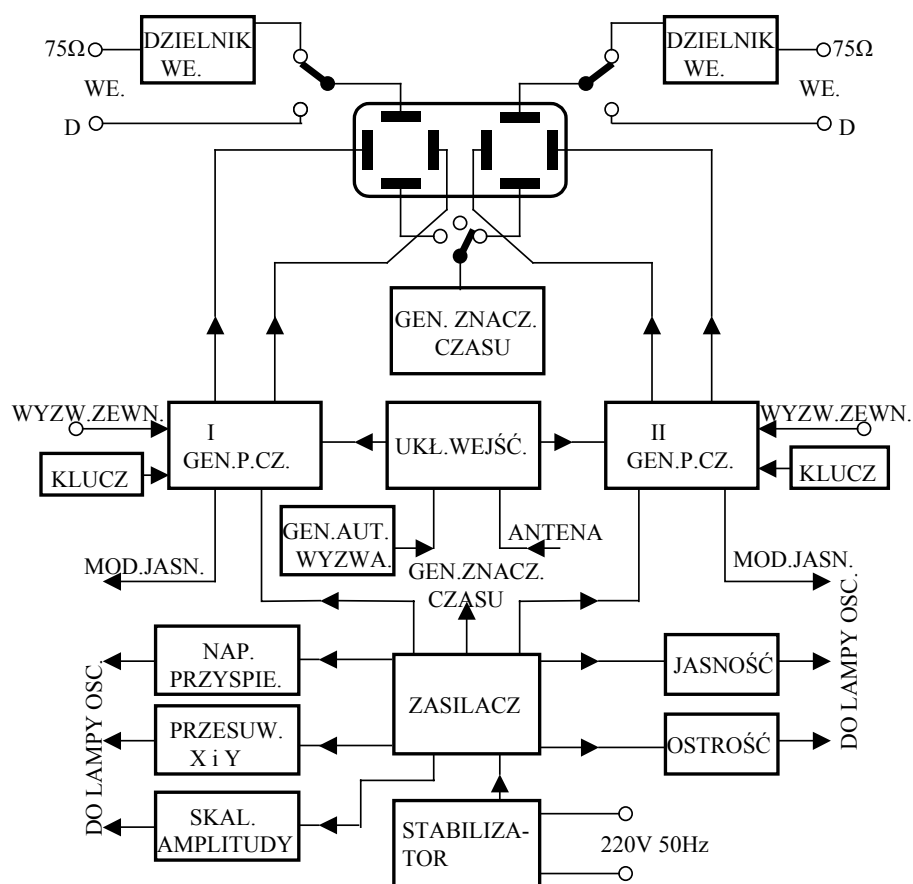
Woltomierze elektrostatyczne techniczne są zbudowane najczęściej w klasie 0,5÷2,5. Podstawowe zalety woltomierzy elektrostatycznych to: duża dokładność (0,5%), bardzo duża rezystancja (do $10^{13}\Omega$), mała pojemność wejściowa (5÷10 pF), duża niezależność od częstotliwości napięcia mierzonego (do kilku MHz). Przyczyną błędów wskazań woltomierzy elektrostatycznych może być ładunek, który wskutek polaryzacji pozostaje na powierzchni dielektryków stanowiących elementy układu izolacyjnego miernika.

2.3. Urządzenia do pomiaru przebiegów udarowych

Do rejestracji przebiegów jednorazowych o czasach trwania rzędu mikrosekund, np. udarów napięciowych, stosowane są oscyloskopy wysokonapięciowe.

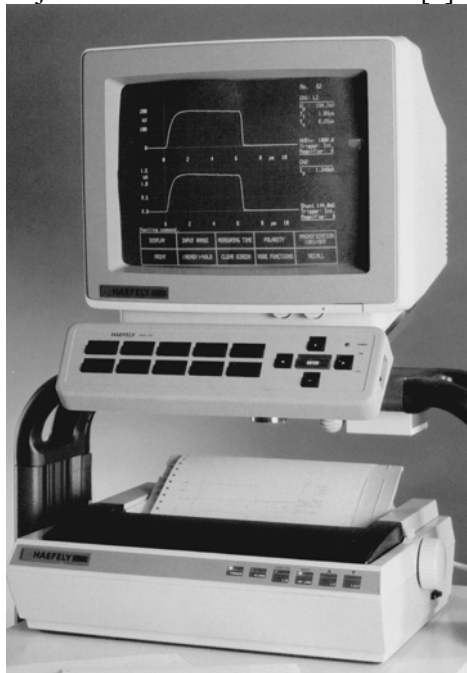
Przebieg badany podawany jest z dzielnika bezpośrednio na płytki pomiarowe. W celu otrzymania na ekranie przebiegu o dostatecznej jasności, która pozwoli na zarejestrowanie go na kliszy fotograficznej, przyspieszenie wiązki elektronów musi być znacznie większe niż w oscyloskopach niskonapięciowych. Dokonuje się tego przez dodanie jeszcze jednej anody, którą umieszcza się poza płytkami odchylającymi, oraz zwiększa się napięcie przyspieszające.

Przy obserwacji przebiegów wyzwalanie podstawy czasu może odbywać się przez sygnał przychodzący z anteny. Kabel łączący wejście oscyloskopu z zaciskiem pomiarowym jest dłuższy od kabla anteny. Długości te dobiera się w taki sposób, aby otrzymać opóźnienie około $0,1 \mu\text{s}$. Brak opóźnienia między podstawą czasu a pojawieniem się sygnału na płytkach pomiarowych powodowałoby trudność w rejestracji czoła przebiegów udarowych. Schemat blokowy oscyloskopu wysokonapięciowego pokazano na rys.19.



Rys. 19. Schemat blokowy oscyloskopu wysokonapięciowego

Jedną z największych wad oscyloskopów wysokonapięciowych jest krótki czas przez który informacja jest dostępna, co wynika z właściwości ekranu lampy oscyloskopowej. Dlatego też w ostatnich czasach wykorzystuje się układy cyfrowe do rejestracji przebiegów udarowych. Metoda ta polega na przetwarzaniu przebiegu czasowego w zbiór dyskretnych próbek odpowiadających kolejnym wartościom chwilowym w równych odstępach czasu. Zbiór ten wyrażony w postaci cyfrowej jest przechowywany w układzie pamięci i wykorzystywany w zależności od potrzeby w trakcie obróbki zarejestrowanej informacji. Przykładem takich urządzeń są mierniki opracowane przez firmę Haefely, które w połączeniu z komputerem typu IBM PC mogą współpracować z dzielnikami napięć piorunowych i układami probierczymi wysokiego napięcia. Nazwy tych urządzeń to DIAS - Digital Impulse Analysing System i HIAS - High Resolution Impulse Analysing System. W układach tych celem zmniejszenia wpływu zakłóceń na ich pracę zastosowano światłowodowe sprzężenie między układami wejściowymi a komputerem. Urządzenia te pozwalają na otrzymanie obrazu przebiegu mierzonego bez zakłóceń (co jest dokonywane poprzez obróbkę zapisu cyfrowego sygnału przy pomocy specjalnego programu), pomierzyć charakterystyczne czasy udaru piorunowego, wyznaczyć czas do ucięcia oraz wartość szczytową. Możliwa jest także statystyczna obróbka wyników pomiarów z prowadzonych badań. Więcej informacji na ten temat można znaleźć w [1].



Rys . 20. Widok miernika typu DIAS 730

Na rys. 20 pokazany jest miernik DIAS 730 na ekranie którego zawarte są informacje z dokonanych pomiarów.

2.4. Dzielniki i boczniki

Dzielniki napięcia są urządzeniami pozwalającymi na pomiar wysokich napięć przyrządami niskonapięciowymi. Składają się z szeregowo połączonych elementów rezystancyjnych, pojemnościowych lub rezystancyjno-pojemnościowych (rys. 21). Jeden koniec układu znajduje się pod działaniem wysokiego napięcia U_1 , a drugi koniec jest uziemiony. Napięcie U_2 na n -tym elemencie układu, licząc od strony końca uziemionego, stanowi niewielką część doprowadzonego do dzielnika napięcia U_1 . Przekładnia dzielnika przy założeniu równomiernego rozkładu napięcia na jego elementach wynosi:

$$\theta = \frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (12)$$

Wymaga się, aby przekładnia nie ulegała zmianie zarówno w czasie, jak i przy zmianach temperatury. Dzielnikom napięcia stawia się dwa podstawowe wymagania:

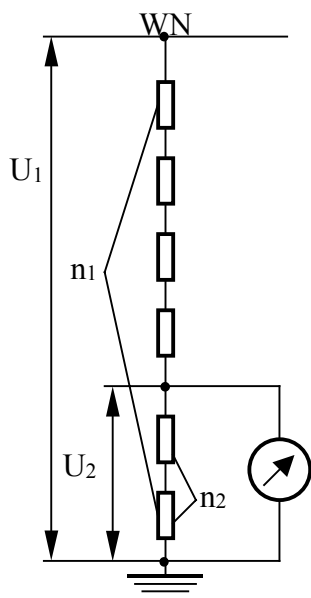
- przyłączenie dzielnika do obwodu nie powinno mieć wpływu na wartość szczytową i kształt napięcia mierzonego,
- dzielnik powinien odtworzyć dostatecznie wiernie na swym członie niskonapięciowym wartość szczytową i kształt mierzonego napięcia.

W praktyce spotyka się trzy typy dzielników napięciowych: rezystancyjne, pojemnościowe i mieszane.

Bez względu na rodzaj elementów składowych zawsze w nich występują indukcyjności i pojemności elementów względem ziemi i względem przedmiotów otaczających. Przy starannym zaprojektowaniu i wykonaniu dzielnika błąd spowodowany deformacją udaru przez dzielnik daje się przy pomiarze udaru normalnego ograniczyć do 3% [1]. Na rys. 22 podano uproszczone schematy zastępcze dzielnika rezystancyjnego i pojemnościowego.

Rezystancyjne dzielniki napięcia stosuje się do pomiaru napięć stałych i udarowych. Wartość rezystancji dzielnika napięcia stałego powinna być tak dobrana, aby nie obciążał on obwodu probierczego. Przy zbyt dużych wartościach mogą wystąpić niedokładności pomiaru na skutek działania ulotu i upływności izolacji. Dzielnik rezystancyjny może być stosowany z zachowaniem dostatecznej dokładności do pomiaru wartości szczytowej udarów pełnych. Przy zastosowaniu dzielnika tego typu do napięć o większych stromościach pomiar obarczony jest błędem przekraczającym dopuszczalne wartości. Błąd ten spowo-





Rys. 22. Uproszczone schematy zstępce
dzielników napięcia: a) dzielnik rezy-
stancyjny, b) dzielnik pojemnościowy

dowany jest rozłożonymi pojemnościami doziemnymi C_z' oraz wzdlużnymi C_w' słupa rezystancyjnego, które decydują o rozkładzie napięcia w pierwszej chwili - (czoło udaru). Podobnie jak na łańcuchu izolatorów, w górnej części dzielnika występują większe spadki napięcia przypadające na jednostkę długości niż w części dolnej. Rozkład napięcia jest więc nieliniowy. Po pewnym czasie, gdy zmienność napięcia jest mała (grzbiet udaru), pojemności praktycznie nie grają roli, nie płynie przez nie prąd; o rozkładzie napięcia decyduje liniowo rozłożona rezystancja dzielnika. Rozkład jest wtedy liniowy. Ponieważ rozkłady napięcia początkowego i końcowego różnią się od siebie, musi istnieć stan przejściowy, którego czas trwania zależy od iloczynu rezystancji dzielnika i jego pojemności doziemnej (przy założeniu, że dzielnik jest wykonany bezindukcyjnie). W celu zmniejszenia wpływu pojemności doziemnych C_z' należy skompensować prąd płynący przez nie do ziemi. Osiąga się to przez kompensację pojemności dzielnika względem ziemi za pomocą ekranowania, np. przez umieszczenie ekranu w kształcie tarczy lub pierścienia na końcu wysokonapięciowej części dzielnika. Ekran można również wykonać w postaci dzwonu obejmującego dzielnik rezy-



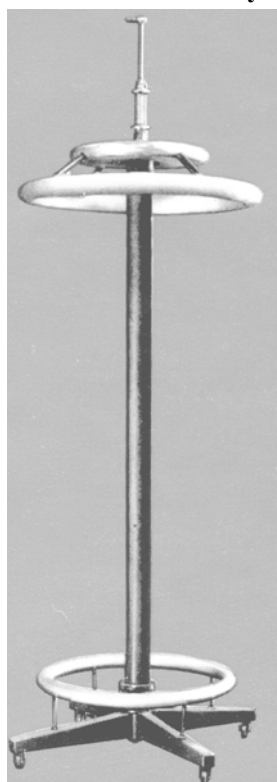
stacyjny (rys. 23). Indukcyjność L dzielnika oporowego ma wpływ na kształt czoła udaru na niskonapięciowej części dzielnika. Jeżeli stała czasowa $\frac{L}{R}$ jest 20-krotnie mniejsza niż czas trwania czoła udaru, to praktycznie nie ma ona takiego wpływu.

Pojemnościowe dzielniki napięcia stosuje się do pomiaru bardzo wysokich (rzędu kilku milionów woltów) napięć o częstotliwości 50 Hz oraz do pomiaru napięć wielkiej częstotliwości. Dzielniki te stanowią małe obciążenie, posiadają dużą niezależność przekładni od częstotliwości i są proste w budowie. Jednak ze względu na ich dużą wrażliwość na wpływy otoczenia (sprężenia pojemnościowe odgrywają znaczną rolę wobec małej pojemności własnej dzielnika) oraz trudności z wyeliminowaniem wpływu kabla opóźniającego, łączącego dzielnik z oscyloskopem, na przekładnię dzielnika - są w praktyce laboratoryjnej dosyć niewygodne w użyciu.

Dzielniki mieszane rezystancyjno-pojemnościowe charakteryzują się niewrażliwością na wpływ otaczających przedmiotów, możliwością uzyskania zgodności pomiędzy pojemnościowym rozkładem napięcia i rozkładem rezystancji wzdłuż dzielnika (związana ze znacznym zmniejszeniem wpływu pojemności doziemnych C_z') oraz dobrą współpracą z kablem opóźniającym. Do wad należy zaliczyć trudną technologię ich wykonania oraz dodatkowe znaczne obciążenie dla układu probierczego.

Przy pomiarach napięć o dużej częstotliwości oraz napięć udarowych osobnym problemem jest takie podłączenie przyrządu pomiarowego (najczęściej jest to oscyloskop), które pozwala uniknąć błędów i odkształceń mogących powstać w obwodzie składającym się z niskonapięciowej części dzielnika, kabla łączącego dzielnik z oscyloskopem, płyt odchyłowych oscyloskopu, wspólnego uziemienia dzielnika i oscyloskopu. Powodem są odbicia na końcach kabla i tłumienie wywołane rezystancją i upływnością.

Rozważmy współpracę dzielnika rezystancyjnego z oscyloskopem (rys. 24). Uwzględniając impedancję falową kabla pomiarowego Z , podział napięcia zachodzi według zależności:

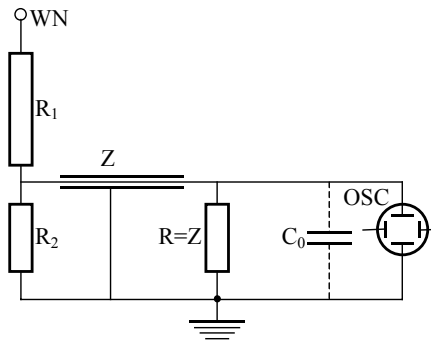


Rys. 23. Widok dzielnika wysokiego napięcia

$$U_2 = \frac{U_1 \frac{ZR_2}{Z+R_2}}{R_1 + \frac{ZR_2}{Z+R_2}} \quad (13)$$

Widzimy, że przy $R_2 \gg Z$ rezystor R_2 nie będzie prawie wpływał na przebieg dzielnika. Oczywiście układ będzie także pracował po odłączeniu rezystora R_2 ; wtedy:

$$U_2 = U_1 \frac{Z}{R_1 + Z} \quad (14)$$



Rys. 24. Schemat współpracy dzielnika rezystancyjnego z oscyloskopem poprzez kabel opóźniający. Z – impedancja falowa kabla, C_0 – pojemność płyt pomiarowych oscyloskopu

Aby zapobiec odbiciom falowym na końcu kabla, prawie otwartym, bo obciążonym tylko bardzo małą pojemnością płyt pomiarowych oscyloskopu (rzędu kilku pF), obciążą się kabel rezystancją skupioną równą impedancji falowej użytego kabla.

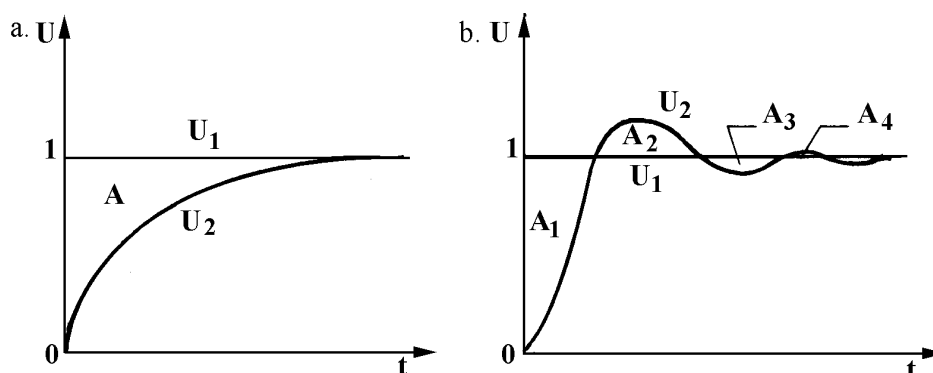
Niskonapięciowa część obwodu pomiarowego nie wprowadza odkształceń, jeśli straty w kablu są małe oraz stała czasu ładowania pojemności płyt

$$\tau = \frac{R \cdot R_2}{R + R_2} C_0 \text{ jest mała w stosunku do czasu trwania czoła udaru. Błąd pocho-}$$

dzący od spadku napięcia na części uziemienia pomiędzy dzielnikiem a oscyloskopem możemy ograniczyć dbając o małą indukcyjność uziemienia (arkusz blachy zamiast linek, możliwie najkrótsze odległości).

Dzielniki, które mają zastosowanie do pomiaru napięć udarowych muszą uprzednio zostać zweryfikowane. Wielkością charakterystyczną jest czas odpowiedzi dzielnika. Wielkość ta jest równa powierzchni A zawartej między udarem

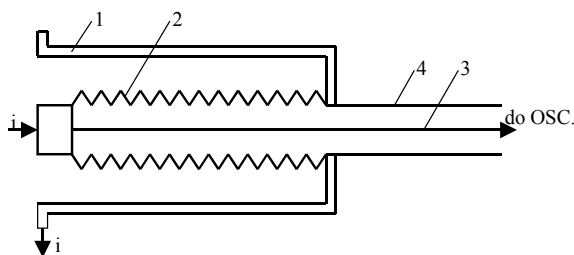
prostokątnym U_1 doprowadzonym na zaciski dzielnika a odpowiedzią U_2 (rys. 25) na części niskonapięciowej.



Rys. 25. Różne przebiegi odpowiedzi dzielnika na uder prostokątny:
a) przebieg wykładniczy, b) przebieg oscylacyjny

W przypadku odpowiedzi oscylacyjnej czas odpowiedzi jest sumą algebraiczną powierzchni $A_1 - A_2 + A_3 \dots$ itd.

Bocznik jest urządzeniem umożliwiającym pomiar prądu w oparciu o rejestrację napięcia.



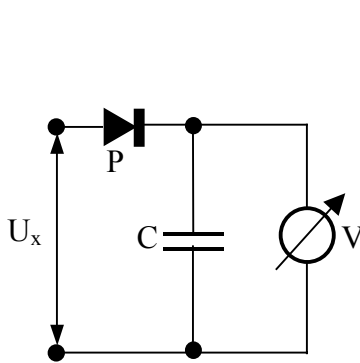
Rys. 26. Schematyczny rysunek konstrukcji bocznika rurowego. 1 – masywna rura miedziana lub mosiężna, 2 – część oporowa, 3 – przewód pomiarowy, 4 – kabel koncentryczny

Z punktu widzenia dokładności pomiaru prądu bocznik powinien posiadać stałą wartość rezystancji niezależną od szybkości zmian prądu, a więc taką samą, jak dla prądu stałego. W rzeczywistości bocznik oprócz rezystancji posiada pewną indukcyjność. Przy powolnych zmianach prądu indukcyjność niewiele wpływa na wartość napięcia na boczniku i można przyjąć, że jest ono równe iloczynowi iR . W przypadku szybkich zmian prądu nie można pominąć wpływu czynnika $L di/dt$ na wartość napięcia. Zatem, aby uzyskać prawidłowe odwzorowanie rzeczywistego przebiegu prądu uderowego, bocznik powinien być elementem możliwie bezindukcyjnym. W celu zmniejszenia i wyeliminowania

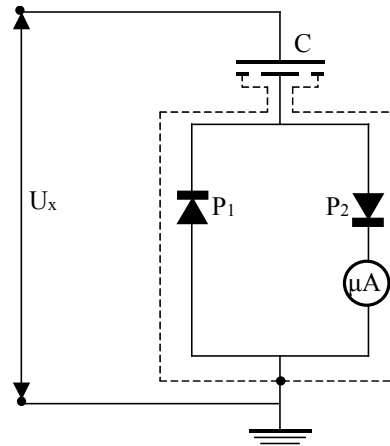
wpływu indukcyjności boczniki prądowe wykonuje się z taśm rezystancyjnych nawiniętych bifilarnie, lub z płytek rezystancyjnych oraz stosuje się kompensację pojemnościową. Zapewnienie bezindukcyjności bocznika, szczególnie dla bardzo dużych wartości szczytowych prądu i szybkich zmian, stanowi bardzo trudne zagadnienie techniczne, a sam bocznik staje się skomplikowaną konstrukcją. Podobnie jak przy dzielnikach, liczbowe kryterium oceny własności pomiarowych bocznika stanowi czas odpowiedzi. Przykład rozwiązania konstrukcyjnego bocznika pokazano na rys. 26.

2.5. Miernik wartości szczytowej

W najprostszej swojej postaci jest to układ pokazany na rys. 27. Kondensator C poprzez diodę P ładuje się do wartości szczytowej napięcia przyłożonego. Należy jednak pamiętać o takim doborze kondensatora C , aby jego stała czasowa ładowania była mniejsza od czasu narastania napięcia mierzonego. Miernikiem mierzącym to napięcie może być woltomierz elektrostatyczny lub magnetoelektryczny z rezystorem. Rezystancja układu pomiarowego dołączona do zacisku kondensatora musi być bardzo duża, aby podczas pomiaru kondensator C nie rozładował się.



Rys. 27. Schemat ideowy woltomierza szczytowego. P – prostownik, C – kondensator, V – woltomierz



Rys. 28. Schemat układu do pomiaru wartości szczytowej metodą prostownikową. C – kondensator wysokonapięciowy, P_1 , P_2 – prostownik, μA – mikroamperomierz

W wersji nowoczesnej, z zachowaniem samej zasady pomiaru, stosuje się elektroniczne mierniki cyfrowe. Tego rodzaju przyrządy przeznaczone są do pomiaru wartości szczytowych impulsów od 0 do 1000 V obu biegunowości o czasach narastania czoła $1 \div 10 \mu s$. Przy pomiarach wysokonapięciowych konieczne jest użycie dzielnika napięcia.

2.6. Metoda prostownikowa pomiaru wartości szczytowej napięcia przemiennego

Spośród wielu metod pomiaru wysokich napięć przemiennych znaczne rozpowszechnienie zyskała metoda prostownikowa, która stanowi jeden z zasadniczych znormalizowanych sposobów pomiaru wartości szczytowej. Zasadę pomiaru ilustruje rys. 28.

Do napięcia mierzonego U_x , przyłącza się kondensator wysokonapięciowy (np. powietrzny lub ze sprężonym gazem) poprzez prostowniki P_1 i P_2 . W szereg z jednym z prostowników włącza się mikroamperomierz. Mikroamperomierz, prostowniki, łączące je przewody oraz przewód dołączony do dolnej okładziny kondensatora muszą być starannie ekranowane, aby przez mikroamperomierz nie przepływały prądy pojemnościowe płynące od przewodów wysokiego napięcia do części niskonapięciowych. Do prostowania prądu stosuje się prostowniki o bardzo dobrych własnościach; mogą to być kenotrony lub lampy elektronowe z siatkami oraz prostowniki półprzewodnikowe.

Mikroamperomierz włączony w szereg z jednym z prostowników mierzy wartość średnią prądu wyprostowanego. Okazuje się że jest ona proporcjonalna do wartości maksymalnej napięcia przemiennego, jeśli krzywa napięcia w funkcji czasu spełnia określone warunki omówione poniżej. Krzywa napięcia może być znacznie odkształcona, lecz winna być jednowierzchołkowa oraz wykazywać symetrię typu $f\left(x + \frac{T}{2}\right) = -f(x)$. Rysunek 29 przedstawia taką krzywą napięcia.

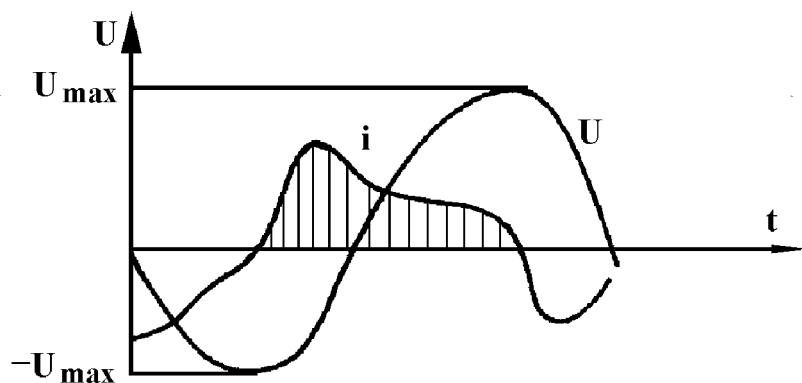
Dla funkcji okresowej o okresie T wartość średnia prądu wyprostowanego wynosi :

$$I_{\text{sr}} = \frac{1}{T} \int_0^T i dt \quad (15)$$

Jeśli funkcja spełni wyżej podane warunki, całkowanie można wykonać zastępując różniczkę idt przez Cdu . Wówczas

$$I_{\text{sr}} = \frac{C}{T} \int_{-U_{\text{max}}}^{U_{\text{max}}} du = 2fCU_{\text{max}} \quad (16)$$





Rys. 29. Przebieg napięcia oraz prądu krzywej jednowierzchołkowej

Dla powyższych rozważań przyjęto prostowniki idealne. Należy jednak zwrócić uwagę, iż charakterystyki rzeczywistych lamp elektronowych nie zaczynają się w początkowym punkcie układu współrzędnych i przy $U = 0$ V od katody do anody przepływa jeszcze pewien strumień elektronów, tak więc w przedziale krzywej napięcia od wartości $+U_0$ do $-U_0$, którym to wartościom odpowiada wartość prądu I_0 , przewodzą równocześnie oba prostowniki. Jeśli więc nie zachowa się szczególnej ostrożności przy wyborze lamp prostowniczych i jeśli nie zastosuje się specjalnych układów kompensacyjnych, wyznaczenie wartości szczytowej napięcia w zależności $U_{\max} = \frac{I_{\text{sr}}}{2fC}$ może być obarczone

znacznym błędem przy niedużych napięciach mierzonych i przy stosowaniu kondensatorów o niewielkich pojemnościach w przypadku bardzo wysokich napięć.

2.7. Inne metody pomiarowe

Do pomiaru przemiennych i stałych napięć i prądów w obwodzie wysokiego napięcia można stosować mierniki niskonapięciowe współpracujące z dzielnikami napięć lub bocznikami. Przy pomiarach wartości skutecznej napięcia stosuje się przekładniki napięciowe. Są to transformatory, których wtórne uzwojenia zasilają przyrządy pomiarowe oraz cewki przekładników. Ze względu na mały pobór mocy przekładniki napięciowe pracują w warunkach zbliżonych do stanu biegu jałowego. Wartość wtórnego napięcia jest znormalizowana i wynosi 100 V, jeżeli przekładniki przeznaczone są do napięcia przewodowego sieci, i $\frac{100}{\sqrt{3}}$ V

dla napięcia fazowego.

Pomiary wartości szczytowej przy pomocy przekładnika, bez znajomości zniekształceń krzywej napięcia probierczego, są niedopuszczalne. Najprostszym sposobem pomiaru przemiennych napięć probierczych jest wykorzystanie pomia-

ru napięcia po stronie pierwotnej transformatora probierczego oraz pomierzonej przekładni, którą można wyznaczyć przez skalowanie układu probierczego.

Przekładnia transformatora probierczego zależy w dużym stopniu od obciążenia. Przy obciążeniu pojemnościowym, jakie stanowi izolacja obiektu badanego, przekładnia rzeczywista transformatora jest większa od przekładni znamionowej.

Skalowanie układu probierczego polega na wyznaczeniu zależności między napięciem mierzonym iskiernikiem kulowym a wskazaniami woltomierza włączonego po stronie dolnego napięcia. Przeprowadza się je przy włączonym w obwód obiekcie badanym dla kilku wartości napięcia mniejszych od napięcia, które ma być stosowane podczas próby napięciowej. Zwykle przy skalowaniu nie przekracza się 60% wartości napięcia probierczego. Napięcie woltomierza, odpowiadające napięciu probierzczemu, wyznacza się z wykresu poprzez ekstrapolację zależności między napięciem mierzonym woltomierzem i iskiernikiem kulowym.

Do pomiaru prądów stosuje się takie metody, jak:

- oscyloskopowy zapis napięcia na boczniku prądowym, który pozwala określić wartość szczytową a także parametry czasowe impulsu prądowego,
- pomiary przy pomocy przekładników prądowych,
- pomiar prądów udarowych przy pomocy transformatora powietrznego (pętla Rogowskiego).

Wymagania stawiane zarówno dzielnikom wysokiego napięcia jak i przyrządom pomiarowym podane są w [N3]. Więcej informacji dotyczących zagadnień poruszanych w części I jak i II można znaleźć w [1, 2].



3. OPRACOWANIE WYNIKÓW DOŚWIADCZEŃ

Wiadomo, że wyniki pomiaru napięć przeskoku, przebicia lub napięć początkowych wyładowań niezupełnych charakteryzują się znacznym rozrzutem. Powody tych rozrzutów mogą leżeć zarówno w samej fizyce zjawisk jak i błędach technologicznych, np.: odchyłki grubości próbek, lokalne defekty struktury itd. Wiąże się to z koniecznością wykonania takiej liczby pomiarów, która umożliwia zastosowanie do obróbki wyników metod rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej. Posługując się wspomnianym już aparatem matematycznym można znaleźć najbardziej prawdopodobną wartość szukanej wielkości oraz określić granice pomiędzy którymi, ze znanym prawdopodobieństwem znajduje się wartość rzeczywista.

Rozrzuty wyników pomiarów podczas badań układów izolacyjnych mogą podlegać różnym rozkładom prawdopodobieństwa. Najważniejsze z nich to: rozkład Normalny, rozkład Studenta i rozkład Weibulla. Podczas pomiarów napięć przeskoku, przebicia, napięć początkowych wyładowań niezupełnych można przyjąć w świetle dotychczasowych badań, że rozkład wyników pomiarów tych wielkości jest zgodny z rozkładem Normalnym w zakresie prawdopodobieństwa $0,02 \div 0,98$. Ponieważ jednak rozkład ten daje właściwe wyniki przy dużej liczbie prób ($n > 30$) w praktyce posługujemy się rozkładem Studenta. Oba te rozkłady pokrywają się przy $n > 30$. Parametrami tego rozkładu są: μ - wartość oczekiwana oraz σ - odchylenie standardowe.

Mając ograniczoną liczbę wyników pomiarów x_i nie znamy wartości oczekiwanej μ oraz odchylenia standardowego badanej populacji. Możemy jednak posłużyć się estymatorami: wartością średnią $\bar{X}$ będącą estymatorem μ oraz oszacowanym odchyleniem standardowym s będącym estymatorem σ . Wartość $\bar{X}$ i s wyznaczamy na podstawie wzorów:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (17)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (18)$$

Mając więc z badań n pomiarów wartości napięć przebicia U , należy wyznaczyć średnią z pomiarów $\bar{U}$



$$\bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n U_k \quad (19)$$

oraz oszacować odchylenie standardowe s

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (U_k - \bar{U})^2}{n-1}} \quad (20)$$

Tabela 3. Wartości liczbowe parametrów do wyznaczania przedziałów ufności dla $\beta = 95\%$

n	$\frac{t}{\sqrt{n}}$	$\sqrt{\frac{n-1}{\chi_1^2}}$	$\sqrt{\frac{n-1}{\chi_2^2}}$
5	1,24	0,60	2,87
10	0,72	0,69	1,83
15	0,55	0,73	1,58
20	0,47	0,76	1,46
30	0,37	0,80	1,34
40	0,32	0,82	1,28
50	0,28	0,84	1,25

W celu wyznaczenia granic między którymi, z określonym prawdopodobieństwem β (poziom ufności), znajduje się rzeczywista wartość średnia (a właściwie parametr rozkładu μ) możemy posłużyć się następującymi zależnościami wynikającymi z rachunku prawdopodobieństwa i matematyki statystycznej

$$\bar{U} - \frac{s t_{\beta,n}}{\sqrt{n}} \leq U_{sr} \leq \bar{U} + \frac{s t_{\beta,n}}{\sqrt{n}} \quad (21)$$

gdzie: $t_{\beta,n}$ - zmienna losowa rozkładu Studenta dla n pomiarów w serii, na poziomie ufności β .

Możemy także wyznaczyć przedział, w którym z prawdopodobieństwem β zawarte jest σ

$$s \sqrt{\frac{n-1}{\chi_1^2}} \leq \sigma \leq s \sqrt{\frac{n-1}{\chi_2^2}} \quad (22)$$

gdzie: χ_1^2, χ_2^2 - zmienne losowe rozkładu χ^2 (chi kwadrat).

W technice najczęściej obliczenia przeprowadza się dla $\beta = 0,95$. W tabeli 3 przedstawiono wartości zmiennych członów podanych nierówności.

Przy statystycznym opracowaniu wyników pomiarów często istnieje potrzeba wyznaczania prostej regresji, która ma zastąpić dystrybuantę empiryczną mającą



przebieg prostoliniowy w odpowiednim układzie współrzędnych. Należy więc wyznaczyć współczynniki równania prostej

$$y = a_0 + a_1 x \quad (23)$$

Można tego dokonać posługując się następującymi wzorami:

$$a_0 = \bar{Y} - a_1 \bar{X} \quad (24)$$

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X}) y_i}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \quad (25)$$

$$\text{gdzie: } \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

Równanie szukanej prostej przybiera postać

$$y - \bar{Y} = a_1 (x - \bar{X}) \quad (26)$$

W celu wyznaczenia prostej regresji należy na oś rzędnych nanieść pomocniczą podziałkę liniową i do poprzednio podanych wzorów podstawić odpowiadające jej wartości y_1 . Obliczone z tych wzorów wartości odnoszą się oczywiście także do nowej podziałki.

Dodatkowe informacje odnośnie do opracowania wyników prób napięciem udarowym piorunowym zostaną podane w ćwiczeniu 4. Całościowe opracowanie problemu matematycznej obróbki wyników doświadczeń można znaleźć w pozycji literatury [3].



4. SZACOWANIE NIEPEWNOŚCI POMIARU PRZY POMIARACH WYSOKONAPIĘCIOWYCH

4.1. Wstęp

Niepewności związane z wyznaczeniem wartości określonej wielkości fizycznej można podzielić na dwa rodzaje: kategorii A i kategorii B.

Pierwszy rodzaj ma charakter statystyczny i związany jest z wpływem czynników przypadkowych nie dających się w sposób analityczny ocenić (np. przy wyznaczaniu napięcia przeskoku w powietrzu – wpływ statystycznego opóźnienia przeskoku, wahania napięcia sieci itp., przy badaniu dielektryków stałych – niejednorodności powstałe w procesie technologicznym, zmiany grubości itp.). Niepewności te mają rozkład statystyczny normalny (Gausa).

Drugi rodzaj jest związany z właściwościami układu pomiarowego. Część z nich ma charakter „systematyczny” wynika bowiem np. z klasy użytych mierników czy przekładników napięciowych lub prądowych. Ta grupa podlega rozkładowi statystycznemu „jednostajnemu” (prostokątnemu). Druga część ma rozkład statystyczny normalny (najczęściej) i związana jest z wyznaczoną np. w procesie certyfikacji układu pomiarowego, taką wielkością jak „współczynnik skali” układu (liczba, przez którą należy pomnożyć wskazania przyrządu pomiarowego by otrzymać wartość napięcia probierczego lub np. przeskoku czy przebiecia), bądź określonego przyrządu pomiarowego np. oscyloskopu czy rejestratora.

4.2. Wyznaczanie niepewności kategorii A

Estymatorami rozkładu normalnego są:

$$\text{Średnia} \quad x_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (n - \text{liczba pomiarów})$$

$$\text{Odchylenie standardowe} \quad s_m = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}$$

Przy małej liczbie pomiarów niepewność na poziomie ufności $\beta = 0,95$ (wartość zalecana) oblicza się z wzoru

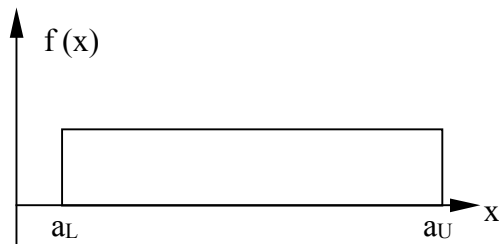
$$U_A = t \cdot \frac{s_m}{\sqrt{n}} \quad (27)$$



gdzie t – jest kwantylem rozkładu Studenta. Jak widać ze wzoru niepewność jest połową dwustronnego przedziału ufności na poziomie $\beta = 0,95$. Przy dużej liczbie pomiarów $n \gg 10$ można stosować kwantyl (współczynnik pokrycia) rozkładu normalnego, który dla $\beta = 0.95$ wynosi $k = 1,96$. Zwykle przyjmuje się jego wartość równą 2.

4.3. Wyznaczanie niepewności kategorii B.

a) niepewności o charakterze systematycznym mające rozkład jednostajny (prostokątny).



Rys.30. Krzywa gęstości rozkładu jednostajnego

Estymatorami tego rozkładu są:

$$\text{połowa szerokości} \quad a = \frac{1}{2}(a_U - a_L)$$

$$\text{odchylenie standardowe} \quad s_{Br} = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

Przy większej liczbie nie skorelowanych odchylenie standardowe wypadkowe można obliczyć ze wzoru

$$s_{Br} = \sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \dots + \frac{a_n^2}{3}} \quad (28)$$

Stąd wypadkowa niepewność

$$U_{Br} = k \cdot s_{Br}$$

gdzie $k = 2$

Jeśli w niepewnościach typu B prócz systematycznych występują również niepewności mające rozkład Gaussa (np. związane z niepewnością wyznaczenia współczynnika skali układu pomiarowego) $U_{Bg1}, U_{Bg2} \dots U_{Bgn}$ to wypadkowa niepewność



$$U_B = k \cdot \sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \dots + \frac{a_n^2}{3} + \frac{U_{Bg1}^2}{k^2} + \frac{U_{Bg2}^2}{k^2} + \dots + \frac{U_{Bgn}^2}{k^2}} \quad (29)$$

gdzie $k = 2$.

4.4. Wypadkowa niepewność uwzględniająca obie kategorie niepewności

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2}$$

4.5. Przykład obliczania niepewności

Przy wyznaczaniu napięć przeskoku układu izolacyjnego z izolacją regenerującą się uzyskano następujące wyniki:

$U_p = 761,3; 740,1; 778,2; 782,6; 776,4; 765,7; 789,9; 771,8; 764,7; 757,5$ kV.

Oszacować całkowitą niepewność pomiaru, jeśli do pomiaru użyto cyfrowego miernika wartości szczytowej klasy $a_{11} = 1$ z 3 i pół cyfrowym wyświetlaczem z niepewnością odczytu 0,5 cyfry. Pomiar prowadzono na zakresie $U_n = 1000$ V. Współczynnik skali układu pomiarowego wyznaczono z niepewnością $U_{Bg1} = 1\%$.

Liczba uzyskanych wyników $n = 10$

Wartość średnia:

$$U_{Psr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{Pi} \quad U_{Psr} = 768,8 \text{ kV}$$

$$\text{Odchylenie standardowe: } S_m = \sqrt{\frac{n}{n-1} \sum_{i=1}^n (U_{Pi} - U_{Psr})^2} \quad S_m = 14,24 \text{ kV}$$

Kwantyl rozkładu Studenta dla poziomu ufności $\beta = 0,95$: $t = 2,26$

$$\text{a) niepewność typu A w \% : } U_A = t \cdot \frac{S_m}{\sqrt{n}} \cdot \frac{100}{U_{Psr}} \quad U_A = 1,33 [\%]$$

b) składniki niepewności typu B w \%:

Klasa miernika $a_{11} = 1$

$$\text{Niepewność odczytu dla zera (0,5 cyfry) dla pełnej skali } a_{22} = 0,5 \cdot \frac{100}{u_{Psr}}$$

Niepewność odczytu wyniku dla pełnej skali (0,5 cyfry) $a_{33} = a_{22}$



Łącznie niepewność odczytu $a_{20} = a_{22} + a_{33}$

Niepewności systematyczne w %, dla wartości mierzonej:

$$a_1 = a_{11} \cdot \frac{U_n}{u_{\text{psr}}} \quad a_2 = a_{20} \cdot \frac{U_n}{u_{\text{psr}}}$$

Niepewność wyznaczenia współczynnika skali $U_{\text{Bg1}} = 1 \%$

Niepewność kategorii B:

$$U_B = k \cdot \sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \left[\frac{U_{\text{Bg1}}}{k} \right]^2} \quad \text{gdzie } k = 2 - \text{kwantyl rozkładu normalnego.}$$

$$U_B = 2,35 \%$$

c) całkowita niepewność:

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad U = 2,7 \%$$

Przyjmuje się za całkowitą niepewność wynik mniej optymistyczny, zaokrąglając w górę do 3 %



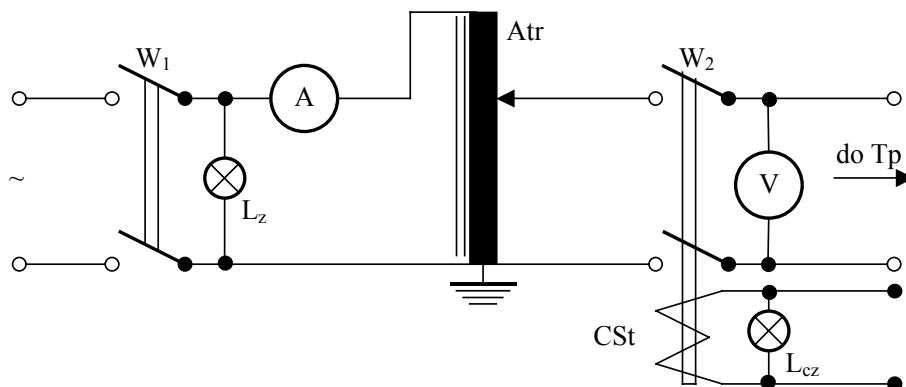
5. UWAGI OGÓLNE

W każdym z ćwiczeń wysokonapięciowych występuje taki sam układ połączeń (wykonany na stałe) między zaciskami napięcia zasilającego a transformatorem probierczym wysokiego napięcia.

Układ ten spełnia następujące funkcje:

- załącza napięcie na zaciski uzwojenia pierwotnego transformatora probierczego,
- umożliwia regulację tego napięcia,
- sygnalizuje stan załączenia,
- umożliwia pomiar napięcia i prądu po stronie pierwotnej transformatora probierczego,
- wyłącza zasilanie transformatora probierczego w przypadku przeskoku czy przebicia,
- wyłącza zasilanie transformatora probierczego w przypadku otworzenia drzwi prowadzących na pole probiercze,
- nie pozwala na włączenie wysokiego napięcia jeżeli autotransformator jest w innym niż zerowe położenie.

Uproszczony schemat układu pokazano na rys. 30. W dalszej części skryptu będzie on nazywany układem regulacji napięcia i oznaczany „UR”.



Rys. 31. Uproszczony schemat układu regulacji wysokiego napięcia. W_1 – wyłącznik ręczny, W_2 – stycznik, Atr – autotransformator, A – amperomierz, V – woltomierz, L_z , L_{cz} – lampki: zielona i czerwona, CSt – cewka stycznika

W każdym ćwiczeniu znajduje się punkt pod tytułem „Uwagi i wnioski”. W punkcie tym w sprawozdaniu należy zamieścić uwagi dotyczące przebiegu ćwiczenia oraz uzyskanych wyników pomiarów. Wyniki te należy porównać z zależnościami podanymi na wykładzie lub znajdującymi się w literaturze

i stwierdzić ich zbieżność lub rozbieżność. W tym drugim przypadku podać prawdopodobną przyczynę ich rozbieżności. Wnioski powinny mieć charakter rzeczowy a ich przedstawienie powinno być przejrzyste i zwięzłe.



LITERATURA

- [1] **Wodziński J.:** Wysokonapięciowa technika prób i pomiarów, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997.
- [2] **Mosiński F.:** Podstawy techniki wysokich napięć, Politechnika Łódzka 1994.
- [3] **Mosiński F.:** Metody statystyczne w technice wysokich napięć, Politechnika Łódzka 1991.
- [N1] **PN – 92/E - 04060** Wysokonapięciowa technika probiercza. Ogólne określenia i wymagania probiercze.
- [N2] **PN – 87/E – 04053** Pomiary wysokonapięciowe. Układy pomiarowe i wskazówki ich stosowania.
- [N3] **PN – EN 60060 – 2** Wysokonapięciowa technika probiercza. Układy pomiarowe.



CZĘŚĆ II

ĆWICZENIA



ĆWICZENIE 1

BADANIE WYTRZYMAŁOŚCI STATYCZNEJ POWIETRZA W UKŁADACH O RÓŻNYCH KSZTAŁTACH ELEKTROD

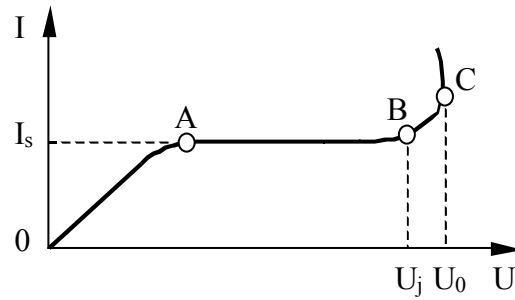
1. WIADOMOŚCI OGÓLNE

1.1. Uwagi wstępne

Powietrze stanowi zbiór cząstek, które w normalnych warunkach znajdują się w ciągłym nieuporządkowanym ruchu (tzw. ruch termiczny). Wśród tych cząstek obojętnych elektrycznie znajduje się też pewna liczba jonów i elektronów powstałych na skutek jonizacji obcej wywołanej promieniowaniem zewnętrznym. Jeśli do elektrod układu, między którymi znajduje się powietrze, przyłożymy napięcie, którego wartość zwiększamy od zera, to jony dążyć będą do elektrody przeciwnego znaku, napotykając po drodze na cząsteczki obojętne i inne jony. Ruch jonów do elektrod oznacza przepływ prądu, którego wartość wzrasta ze wzrostem napięcia do tzw. prądu nasycenia, przy którym wszystkie jony będą przyciągane przez elektrody (rys. 1.1.) Dla układu płaskiego w powietrzu wartość prądu nasycenia jest rzędu $I_s = 2 \cdot 10^{-19} \cdot a \cdot S$ amperów, gdzie: a - odstęp elektrod w cm, S - ich powierzchnia w cm^2 .

Przy dalszym podwyższaniu wartości napięcia, powyżej U_j (napięcie jonizacji), zaobserwujemy gwałtowny wzrost prądu spowodowany wystąpieniem jonizacji zderzeniowej. Jonizacja zderzeniowa występuje praktycznie przy natężeniu pola około $30 \text{ kV}_{\text{max}}/\text{cm}$ (przy ciśnieniu atmosferycznym). Prąd przepływający przez gaz przy napięciach mniejszych nazywany jest niesamoistnym, (ponieważ znikłby, gdyby znikła jonizacja zewnętrzna), zaś, powyżej U_0 (napięcie początkowe) mamy do czynienia z przepływem prądu samoistnego; w tym stadium wyładowania zachodzi jonizacja lawinowa podtrzymywana zjawiskami zachodzącymi w układzie między elektrodami. Dalszy przebieg zjawiska zależy od układu elektrod, w którym zachodzi wyładowanie.





Rys. 1.1 Zależność prądu płynącego przez gaz od napięcia przyłożonego do elektrod. I_s – prąd nasycenia, U_j – napięcie jonizacji, U_0 – napięcie początkowe wyładowania samoistnego

W układach o polu równomiernym, np. iskiernikach płaskich lub iskiernikach kulowych o dużym stosunku średnicy elektrod do odległości między nimi, przy napięciu U_0 powstaje przeskok iskry łączącej obie elektrody, czyli napięcie U_0 jest napięciem przeskoku $U_0 = U_p$.

W układach o polu nierównomiernym, $U_p > U_0$, przy napięciu U_0 występuje światlenie w obszarze bezpośrednio przylegającym do elektrod. Przy dużych odstępach między elektrodami w układach o polu nierównomiernym, przy napięciach $U_0 < U < U_p$, występuje wyładowanie snopiące, które jeszcze nie łączy elektrod, po czym dopiero przy napięciu U_p powstaje iskra (lub łuk) zwierająca elektrody.

Wytrzymałość powietrza w dowolnym układzie elektrod jest funkcją ciśnienia i temperatury. Wraz ze wzrostem ciśnienia maleją odległości między cząstkami powietrza, a więc i średnia droga swobodna elektronu, na której elektron poruszając się w polu elektrycznym zyskuje energię kinetyczną; maleje, więc zdolność do jonizacji cząsteczki obojętnej przy zderzeniu. W celu spowodowania przeskoku należy zwiększyć wartość napięcia przyłożonego do układu elektrod. Wzrost temperatury powietrza pociąga za sobą zmniejszenie napięcia przeskoku, ponieważ gęstość maleje.

Jeśli przez U_{pn} oznaczmy napięcie przeskoku w warunkach normalnych, ciśnienie $b = 1013 \text{ hPa}$, (760 mm Hg), temperatura powietrza, $T = 293 \text{ K}$ ($t = 20^\circ\text{C}$) i wilgotność bezwzględna, $w_n = 11 \text{ g/m}^3$ napięcie przeskoku U_p dla ciśnienia b i temperatury t można obliczyć korzystając z zależności:

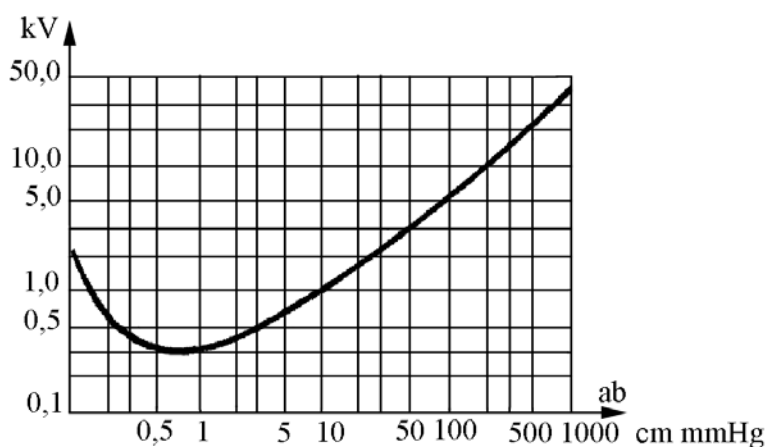
$$U_p = U_{pn} \delta \quad (1.1)$$



gdzie: $\delta = \frac{b}{1013} \cdot \frac{273+20}{273+t}$ - gęstość względna powietrza,
 b - w hPa.

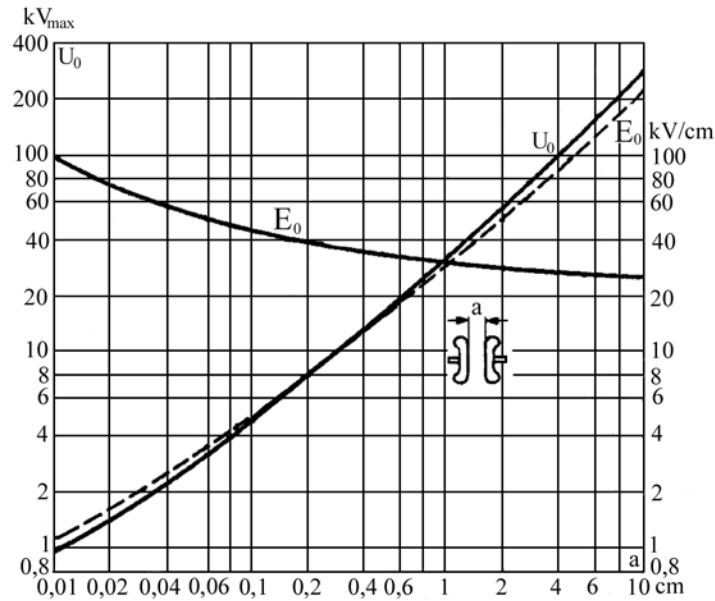
1.2. Wytrzymałość powietrza w układzie o polu równomiernym

W układzie o polu równomiernym dla odstępów elektrod mniejszych od 12 cm wytrzymałość powietrza jest funkcją gęstości powietrza i wymiarów geometrycznych układu, przy czym dla powietrza przy $1 < ab < 1,33 \cdot 10^4 \text{ mm} \cdot \text{hPa}$ (1000 cm mm Hg) (a - odstęp pomiędzy elektrodami, ciśnienie gazu) spełnione jest prawo Paschena: $U_0 = f(ab)$ (porównaj rys. 1.2.)



Rys. 1.2. Zależności napięcia początkowego U_0 od iloczynu odległości elektrod a i ciśnienia powietrza b

Początkowe napięcie i naprężenia, U_0 i E_0 , w układzie o polu równomiernym zależą od ciśnienia, temperatury i odległości pomiędzy elektrodami zgodnie z wykresami podanymi na rys. 1.3.



Rys. 1.3. Zależność napięcia początkowego (przeskoku) w polu równomiernym oraz odpowiadającego mu natężenia początkowego od odstępu elektrod w powietrzu w temperaturze $T = 293 \text{ K}$ (20°C) pod ciśnieniem 1000 hPa (750 mmHg). Linia ciągła – wartości zmierzone, linia przerywana – wartości obliczone

1.3. Wytrzymałość powietrza w układach o polu nierównomiernym

Wytrzymałość układów o polu nierównomiernym jest funkcją ciśnienia i temperatury (porównaj p. 1.1.), ponadto zmienia się w przybliżeniu wprost proporcjonalnie do wilgotności, gdyż w powietrzu wilgotnym niektóre elektrony mogą stać się ośrodkami kondensacji pary wodnej, wskutek czego są wyeliminowane z procesu jonizacji. Dla układów o polu nierównomiernym należy zamiast wzoru (1.1) stosować wzór:

$$U_p = U_{pn} \delta k \quad (1.2)$$

gdzie: δ - gęstość względna powietrza określona poprzednio,

$k \cong 1 + (w - 11) 0,012$ - współczynnik poprawkowy, w którym w jest wilgotnością bezwzględną powietrza, w g/m^3 .



Na rys. 1.4. podano schematyczne porównanie wytrzymałości układów o różnych krzywiznach elektrod, jako ilustrację do rozważań o wytrzymałości powietrza w różnych układach.

Dla układu ostrzowego napięcie przeskoku można obliczyć na podstawie empirycznych zależności podanych przez BBC (a - odstęp między elektrodami, w cm):

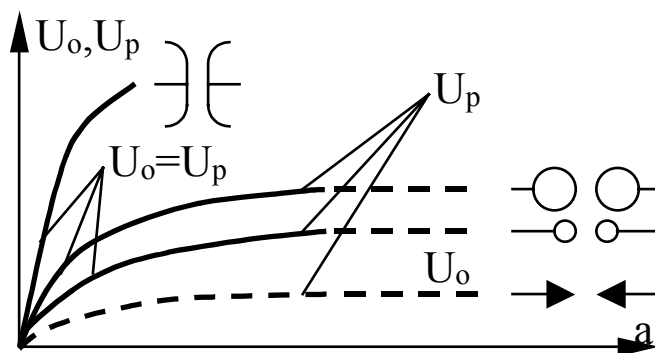
- dla układu niesymetrycznego (jedna elektroda uziemiona, druga dołączona do źródła napięcia)

$$U_p = 14 + 3,16 a \text{ [kV}_{sk}] \quad (1.3)$$

- dla układu symetrycznego

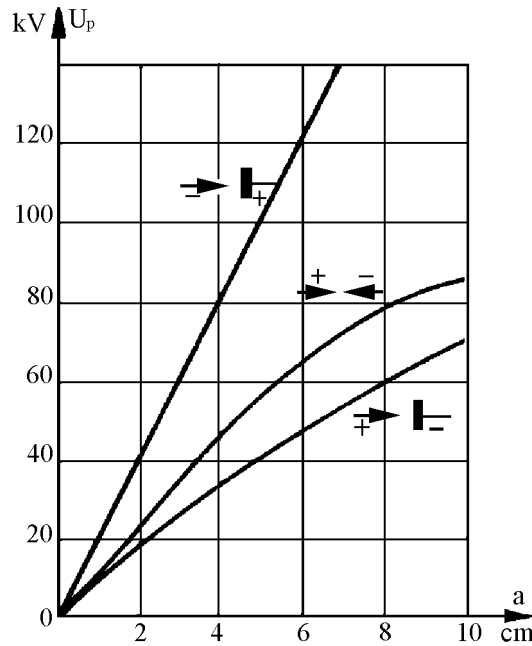
$$U_p = 14 + 3,36 a \text{ [kV}_{sk}] \quad (1.4)$$

Wzory (1.3) i (1.4) słuszne są dla odstępów elektrod $a > 8$ cm, przy czym dla odstępów $a > 30$ cm zapewniają większą zgodność wyników pomiarów z obliczeniami. Wzory te są słuszne dla następujących warunków atmosferycznych: ciśnienie $b = 960$ kPa (720 mm Hg), temperatura $t = 20^\circ\text{C}$, wilgotność bezwzględna powietrza $w = 13,8$ g/m³.



Rys. 1.4. Przebieg charakterystyk U_0 i U_p w funkcji odstępów elektrod a dla układów: płaskiego, kulowych i ostrzowego

Ponieważ warunki atmosferyczne, dla których słuszne są wzory (1.3) i (1.4), różnią się od warunków normalnych, zatem dla obliczenia napięcia przeskoku układu ostrzowego w warunkach normalnych należy wartości obliczone według wzorów (1.3) i (1.4) pomnożyć przez współczynnik równy 1,021.



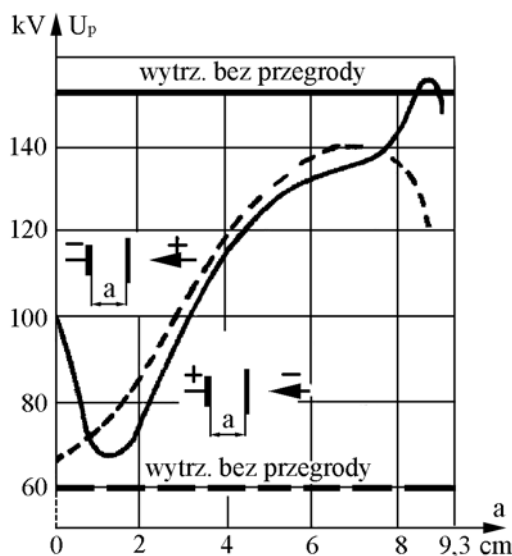
Rys. 1.5. Zależność napięcia przeskoku, U_p od odległości między elektrodami w układzie ostrze- płyta i ostrze-ostrze przy napięciu stałym

W układzie ostrze - płyta wytrzymałość zależy w sposób istotny od biegunowości przyłożonego napięcia. Obok warunku $U_0 < U_p$ dochodzą: $U_0^+ > U_0^-$ oraz $U_p^+ < U_p^-$ (porównaj rys. 1.5). Wynika to z dwóch zjawisk.

W przypadku ostrza ujemnego elektrony zapoczątkowujące rozwój lawin mogą być uwalniane z metalowego ostrza na drodze fotoemisji. Przy ostrzu dodatnim elektrony te powstają na drodze fotojonizacji cząstek gazu. Energia potrzebna na oswobodzenie elektronu z metalu (praca wyjścia) jest znacznie niższa niż w przypadku energii potrzebnej do zjonizowania cząsteczki gazu.

Jonizacja zderzeniowa powstaje w miejscu o dużym natężeniu pola, a więc przy ostrzu. Elektrony są bardzo ruchliwe, toteż zaraz po powstaniu dochodzą do anody; przy ostrzu pozostają prawie wszystkie jony dodatnie. W przypadku ostrza dodatniego powoduje to „osłabienie” natężenia pola wokół ostrza a więc utrudnienie rozwoju lawin (i wzrost U_0^+ potrzebnego do jonizacji) oraz „wzmocnienie” pola w pozostałej części układu (lepsze warunki do rozwoju strimera), obniżając jego wytrzymałość (U_p^+ maleje). Podobnie przy ostrzu ujemnym jony dodatnie „wzmacniają” pole powodując obniżenie U_0^- oraz osłabiają pole w pozostałej przestrzeni powodując wzrost U_p^- .

Wprowadzenie przegrody w przestrzeń między elektrodami układu ostrze-płyta powoduje zmianę wytrzymałości układu (rys. 1.6.).



Rys. 1.6. Wpływ przegrody na napięcie przeskoku w układzie ostrze-płyta przy napięciu stałym

W układzie walców współosiowych maksymalne natężenie początkowe według Peek'a można określić ze wzoru:

$$E_0 = 22,3\delta \left(1 + \frac{0,305}{\sqrt{\delta r}} \right) \left[\frac{\text{kV}_{\text{sk}}}{\text{cm}} \right] \quad (1.5)$$

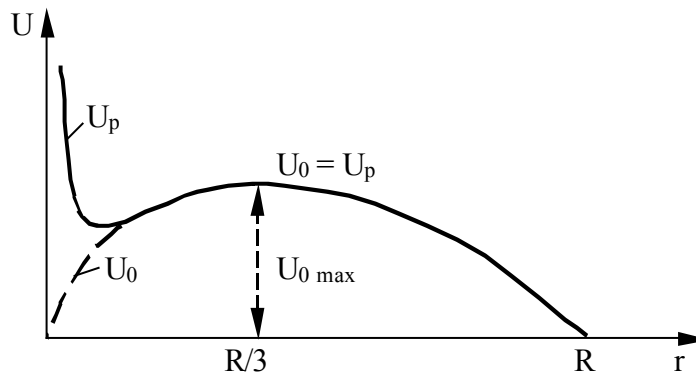
zatem napięcie początkowe

$$U_0 = 22,3\delta \left(1 + \frac{0,305}{\sqrt{\delta r}} \right) r \ln \frac{R}{r} [\text{kV}_{\text{sk}}] \quad (1.6)$$

Zależności $U_0 = f(r)$ i $U_p = f(r)$ przedstawiono na rys. 1.7.

Napięcie początkowe U_0 w układzie walców współosiowych i w układzie równoległych przewodów walcowych nosi nazwę napięcia ulotu. Należy zwrócić uwagę na konieczność prawidłowego ukształtowania elektrod układu w celu

uniknięcia wyładowań krawędziowych powstających przy napięciach niższych niż określone wzorem (1.6).

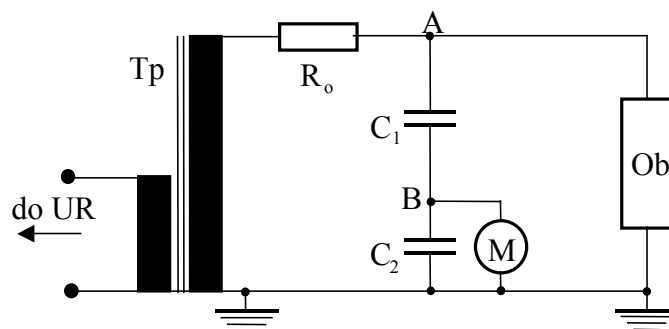


Rys. 1.7. Charakterystyki $U_0 = f(r)$ i $U_p = f(r)$ dla układu walców współosiowych

2. POMIARY

2.1. Badanie wytrzymałości statycznej powietrza w układach o różnych kształtach elektrod przy napięciu przemiennym

Schemat połączeń



Rys. 1.8. Schemat układu do prób napięciem przemiennym.

UR - regulator napięcia, Tp - transformator probierczy, Ro - rezystor ograniczający, Ob - obiekt badany, C1, C2 - dzielnik pojemnościowy, M - miernik wartości szczytowej

Sposób wykonania pomiarów.

Uwagi:

1. Przed przystąpieniem do pomiarów należy: odczytać i zapisać wartości ciśnienia atmosferycznego, temperatury i wilgotności.
2. Każdy pomiar należy powtórzyć pięciokrotnie i jako wynik przyjmować wartość średnią.

Układ płaski - zmierzyć napięcie przeskoku dla co najmniej 4 odstępów elektrod iskiernika zawartych w granicach od 0,5 do 2 cm (średnica elektrod iskiernika płaskiego 10 cm).

Układ ostrzowy niesymetryczny - wykonać pomiar napięcia początkowego wyładowań świetlających oraz napięcia przeskoku. Pomiary wykonać, dla co najmniej 6 odstępów elektrod iskiernika w granicach od 1 do 15 cm.

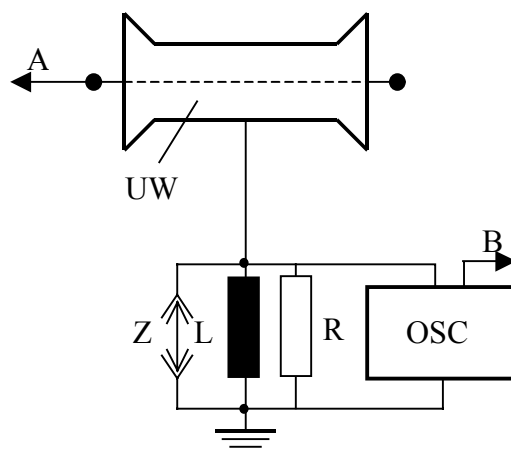
Układ walców współosiowych - wykonać oscyloskopowe obserwacje prądu ulotu oraz pomiary napięcia świetlenia i przeskoku przy różnych średnicach walca wewnętrznego. Promień walca zewnętrznego wynosi $R = 150$ mm. Oscyloskopowe obserwacje prądu ulotu dokonać w układzie pokazanym na rys. 1.9. dla jednej z trzech najcieńszych elektrod wewnętrznych obiektu badanego. Napięcie probiercze należy podnosić powoli, obserwując przebiegi czasowe na ekranie oscyloskopu. do chwili wystąpienia ulotu. Naszkicować obserwowany przebieg.

Przy wykonywaniu połączeń układu badanego i podczas pomiarów należy pamiętać o:

1. Wyjęciu zwiernika Z (rys. 1.9) przy obserwacji prądu ulotu.
2. Sprawdzeniu czy układ jest uziemiony.
3. Staniu na chodniku izolacyjnym w czasie obsługi oscyloskopu.
4. Włożeniu zwiernika Z podczas pomiarów napięcia świetlenia i przeskoku.

Układ elektrod płaskich - zmierzyć napięcie przeskoku iskiernika płaskiego o odległości elektrod 0,5 cm dla różnych wartości ciśnienia powietrza otaczającego iskiernik.





Rys. 1.9. Schemat połączeń do oscyloskopowej obserwacji prądu ulotu. UW - układ walców współosiowych, R – rezystor, L – indukcyjność, OSC – oscyloskop, Z - zwiernik

Opracowanie wyników pomiarów.

Układ płaski - należy obliczyć wartość natężenia przeskoku w warunkach normalnych oraz wykreślić charakterystyki napięcia i natężenie przeskoku w warunkach normalnych w funkcji odstepu elektrod.

Układ ostrzowy niesymetryczny - należy obliczyć na podstawie podanych wzorów wartość napięć przeskoku w warunkach normalnych dla badanych odstępów oraz wykreślić charakterystyki napięcia początkowego wyładowań świetlących i napięcia przeskoku w funkcji odstepu elektrod.

Oszacować niepewność wyznaczonego napięcia przeskoku dla jednego wybranego odstepu elektrod. Obliczenia wykonać korzystając z informacji podanych w części I skryptu punkcie 4. Do obliczeń należy przyjąć :

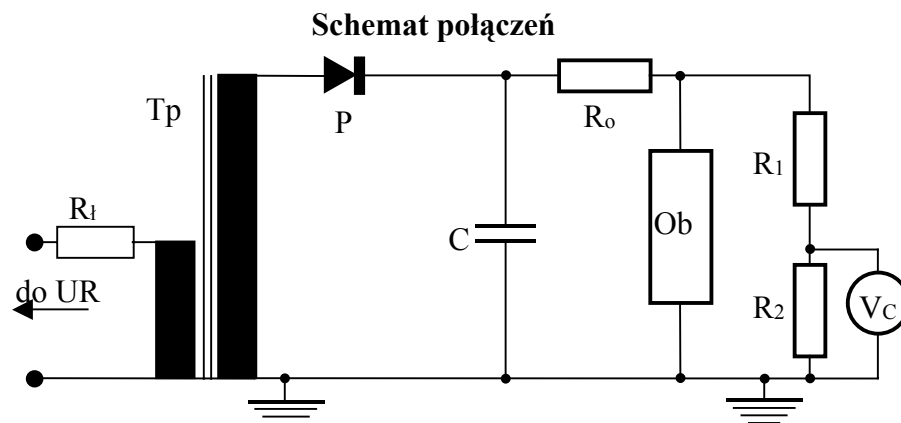
- niepewność wyznaczenia współczynnika skali $\pm 1,5\%$,
- klasa miernika wartości szczytowej 1,5,
- rozdzielczość miernika 0,5 działki.

Uwaga: Wszystkie pomierzone charakterystyki dla wyżej wymienionych układów należy podać na wspólnym wykresie.

Układ walców współosiowych - zamieścić w sprawozdaniu szkic przebiegu prądu ulotu i we wnioskach podać interpretację. Obliczyć maksymalne natężenie początkowe wyładowań świetlących według podanych wzorów oraz wykreślić charakterystyki napięcia początkowego wyładowań świetlących oraz napięcia przeskoku w funkcji stosunku $\frac{r}{R}$.

Układ elektrod płaskich - wykreślić charakterystykę napięcia przeskoku w funkcji ciśnienia.

2.2. Badanie wytrzymałości powietrza w układach o różnych kształtach elektrod przy napięciu stałym



Rys. 1.10. Schemat układu do prób napięciem stałym o biegunowości dodatniej, przy biegunowości ujemnej należy przełączyć prostownik P.
 R_γ - rezystor ładujący, P. - prostownik, C - kondensator filtrujący, V_c - woltomierz cyfrowy, R_1 , R_2 - dzielnik rezystancyjny, pozostałe oznaczenia jak na rys. 1.8.

Sposób wykonania pomiarów

Uwagi:

1. Przed przystąpieniem do pomiarów przy napięciu stałym należy włączyć rezystor R_1 po stronie pierwotnej transformatora probierczego, zgodnie ze schematem z rys. 1.10.
2. Przed przystąpieniem do manipulacji przyrządami na polu probierczym należy założyć drążek uziemiający na uchwyt znajdujący się w górnej elektrodzie kondensatora C.
3. Po zakończeniu pomiarów przy napięciu stałym należy: pozostawić na stałe drążek uziemiający na kondensatorze C.

Układ ostrze-płyta - dla obydwu biegunowości wykonać pomiary napięcia początkowego wyładowań świetlanych oraz napięcia przeskoku. Pomiary wykonać dla co najmniej 5 odstępów elektrod w granicach od 1 do 5 cm.

Opracowanie wyników pomiarów

Na wspólnym wykresie narysować charakterystyki napięcia początkowego wyładowań świetlących i napięcia przeskoku w warunkach normalnych dla obydwu biegunowości.

Uwaga: Wszystkie pomierzone i obliczone wartości wraz z przykładami obliczeń zamieścić w sprawozdaniu. Opracowanie wyników doświadczeń dokonać zgodnie z informacjami podanymi w części I skryptu w punkcie 3.

3. UWAGI I WNIOSKI



ĆWICZENIE 2

WYZNACZANIE ROZKŁADU NAPIĘĆ I NAPRĘŻEŃ W UKŁADACH IZOLACYJNYCH

1. WIADOMOŚCI OGÓLNE

Wytrzymałość elektryczna układu izolacyjnego zależy między innymi od rozkładu naprężeń elektrycznych, przy czym decydujące znaczenie mają wartości największe tych naprężeń. Przy dużych naprężeniach występuje naruszenie struktury materiału izolacyjnego, które może być trwałe (np. przebicie dielektryku stałego) lub przemijające (np. przeskok w powietrzu lub oleju izolacyjnym). Konstruktor musi zatem tak projektować, aby przy wymaganym dla danego urządzenia elektrycznego napięciu probierczym nie przekroczyć dopuszczalnych dla danego rodzaju materiału izolacyjnego naprężeń elektrycznych. Znajomość rozkładu naprężeń elektrycznych ma zatem pierwszoplanowe znaczenie przy projektowaniu układów izolacyjnych urządzeń elektrycznych.

Mimo, iż w zagadnieniach izolacji podstawowe znaczenie mają napięcia zmienne tylko w wyjątkowych przypadkach konieczne jest stosowanie równań Maxwella do wyznaczania naprężeń w polu elektrycznym. W większości przypadków, ze względu na ograniczone wymiary układów izolacyjnych, można pominąć wpływ sił elektromotorycznych indukowanych w przestrzeni przez szybkozmienne prądy przepływające przez dielektryk. Ponadto można przyjąć, że prądy w dielektryku są praktycznie prądami pojemnościowymi. Nie toleruje się bowiem w technice wysokich napięć dielektryków, dla których współczynnik stratności dielektrycznej $\tan \delta$ jest większy niż 0.1. Dla dobrego dielektryku ma on wartości o kilka rzędów wielkości mniejsze. Można zatem, podobnie jak w elektrostatyce, przyjąć, iż o rozplywie prądu i rozkładzie naprężeń decydują wyłącznie przenikalności elektryczne ϵ poszczególnych dielektryków wchodzących w skład układu izolacyjnego. Na granicy tych dielektryków (rys. 2.1) naprężenia normalne do powierzchni granicznej (E_{1n} , E_{2n}) są odwrotnie proporcjonalne do przenikalności elektrycznych:



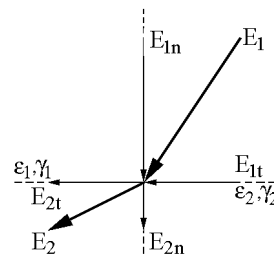
$$\frac{E_{n1}}{E_{n2}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

natomiast składowe styczne naprężeń dielektrycznych (E_{1t} , E_{2t}) są sobie równe:

$$E_{1t} = E_{2t}$$

W tabeli 2.1 podano wartości przenikalności elektrycznych względnych i przewodności właściwych niektórych dielektryków stosowanych w układach izolacyjnych.

Przy napięciu stałym (w stanie ustalonym) rozkład naprężeń w dielektryku zależy tylko od upływności. Również ten rozkład upływnościowy, związany z pewną przewodnością właściwą γ dielektryku, jest ściśle zgodny z rozkładem elektrostatycznym w układach z dielektrykiem jednorodnym. Na tej zasadzie opierają się metody badania modelowego pól elektrostatycznych (metoda wanny elektrolitycznej i metoda papieru półprzewodzącego).



Rys. 2.1. Załamanie linii pola elektrycznego przy przejściu przez powierzchnię graniczną dwóch dielektryków

Tabela 2.1. Wartości współczynników ε' i γ dla niektórych materiałów izolacyjnych

Rodzaj dielektryku	ε'	γ [1/ Ωcm], ($t = 20^\circ\text{C}$)
Powietrze	1	10^{-20}
Olej izolacyjny	2.2	$10^{-12} \div 10^{-18}$
Parafina	2.2	-
Bakelit	2.9	$10^{-13} \div 10^{-16}$
Drewno impregnowane olejem	3.3	-
Guma	$3 \div 3.5$	$10^{-9} \div 10^{-16}$
Pleksiglas	3.5	$10^{-13} \div 10^{-16}$
Papier kondensatorowy impregnowany olejem	$3.5 \div 4.3$	$10^{-10} \div 10^{-11}$
Preszpan	4.4	-
Porcelana	$5 \div 6.5$	$10^{-11} \div 10^{-14}$
Szkło	$5 \div 8$	$10^{-15} \div 10^{-18}$
Mika	$6 \div 8$	-

Łatwo wykazać, że w układach izolacyjnych z jednym tylko dielektrykiem między pojemnością C układu i przewodnością G zachodzi zależność:

$$\frac{C}{G} = \frac{\varepsilon}{\gamma}$$

W układach złożonych z wielu dielektryków na powierzchniach granicznych (rys. 2.1) następuje skokowa zmiana składowych normalnych naprężeń pola elektrycznego, przy czym :

$$\frac{E_{1n}}{E_{2n}} = \frac{\gamma_2}{\gamma_1}$$

oraz

$$E_{1t} = E_{2t}$$

Między przenikalnością elektryczną materiału izolacyjnego a jego przewodnością właściwą nie ma korelacji. Stąd wynika, że rozkład pola elektrycznego w jednym i tym samym układzie izolacyjnym, złożonym z wielu różnych dielektryków jest inny przy napięciu stałym niż przy napięciu przemiennym. Należy o tym pamiętać, przy stosowaniu próby zastępczej napięciem stałym dla układów izolacyjnych przeznaczonych do pracy przy napięciu przemiennym.

W istotny sposób na rozkład naprężeń w układach izolacyjnych wpływa kształt elektrod i ich wzajemne położenie. Największe naprężenia elektryczne występują przeważnie przy powierzchniach elektrod i są tym większe im większa jest ich krzywizna. W układach złożonych z wielu dielektryków o różniących się znacznie przenikalnościami elektrycznymi duże naprężenia mogą występować również z dala od elektrod, w materiale posiadającym mniejszą przenikalność (np. we wtrącinach gazowych znajdujących się wewnątrz dielektryku stałego).

Na rysunku 2.2 przedstawiono za pomocą siatki linii sił pola i linii powierzchni ekwipotencjalnych obrazy pól elektrycznych w kilku wybranych układach izolacyjnych.

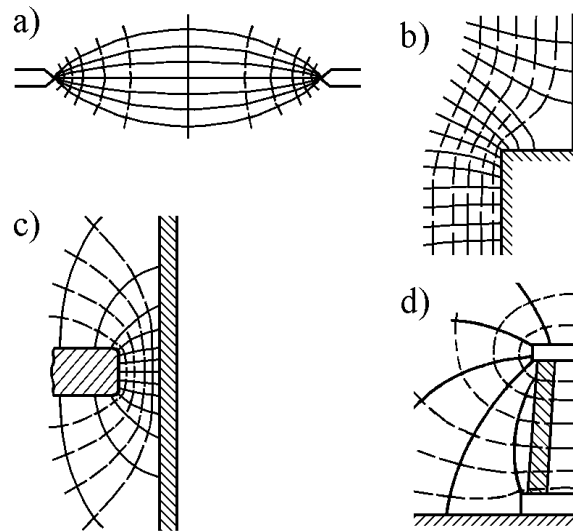
Znając obraz pola elektrycznego można określić naprężenia w dowolnym punkcie układu izolacyjnego. W tym celu należy posłużyć się równaniem:

$$\vec{E} = -\text{grad}V$$

z którego wynika, że średnia wartość naprężenia E_{sr} wzdłuż drogi Δa między sąsiednimi liniami ekwipotencjalnymi o potencjałach V_1 i V_2 jest równa:



$$E_{\text{sr}} = \frac{V_1 - V_2}{\Delta a}$$



Rys. 2.2. Obraz pola elektrycznego: a) układ ostrzowy, b) uskok na elektrodzie płaskiej, c) układ typu przepustowego, d) izolator wsporczy

1.1. Rozkład naprężeń w układzie płaskim uwarstwionym szeregowo

Najprostszym układem izolacyjnym, złożonym z wielu dielektryków, jest układ płaski uwarstwiony szeregowo. W układzie tym, jeśli pominąć efekty krańcowe, występują tylko składowe normalne naprężeń dielektrycznych. W przypadku układu złożonego z n warstw o przenikalnościach elektrycznych $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$ naprężenia E_k w dowolnej k -tej warstwie, przy napięciu przemiennym U , można obliczyć według wzoru:

$$E_k = \frac{U}{\epsilon_k \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{\epsilon_i}} \quad (2.1)$$

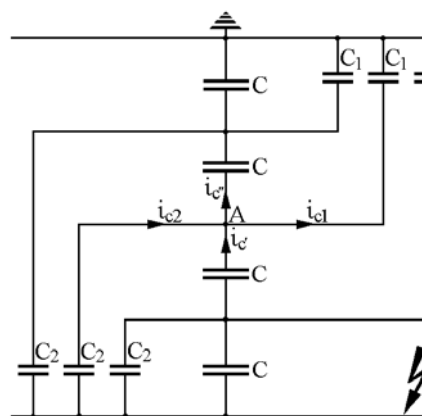
gdzie: $a_1, a_2, \dots, a_n$ – grubość dielektryków w poszczególnych warstwach.

Przy napięciu stałym w miejsce przenikalności elektrycznych należy do powyższego wzoru wpisać przewodności właściwe dielektryków $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$.

Największe naprężenia w układzie uwarstwionym szeregowo płaskim występują w warstwie o najmniejszej przenikalności elektrycznej przy napięciu przemiennym i w warstwie o najmniejszej przewodności właściwej dielektryka w przypadku napięcia stałego. Jest to okoliczność bardzo niepomyślna dla konstruktora, gdyż dielektryki o małej przenikalności elektrycznej i małej przewodności właściwej przeważnie posiadają również małą wytrzymałość elektryczną. Wskutek tego w układach płaskich uwarstwionych szeregowo staje się niemożliwe pełne wykorzystanie pozostałych dielektryków. Zagadnienie to szczególnie ostro występuje przy napięciu stałym w układach izolacyjnych z dielektrykiem gazowym, a to ze względu na dużo mniejsze przewodność właściwą gazu ($\gamma \approx 10^{-20} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$) w porównaniu z przewodnością właściwą dielektryków stałych i płynnych. Oczywiście przy dużych wartościach naprężeń (w normalnych warunkach atmosferycznych w powietrzu przy $E > 30 \text{ kV/cm}$) w gazie powstaną wyładowania niezupełne, wskutek czego rozkład napięcia ulegnie zmianie. Warstwa dielektryku gazowego praktycznie będzie zwarta, a całe napięcie doprowadzone do układu rozłoży się na pozostałe warstwy izolacyjne.

1.2. Rozkład napięcia wzdłuż łańcucha izolatorów

W liniach elektroenergetycznych najwyższych napięć do izolowania przewodów roboczych od konstrukcji słupów stosuje się między innymi łańcuch izolatorów kołpakowych. Rozkład napięcia wzdłuż tych łańcuchów jest na ogół silnie niejednostajny ze względu na wpływ pojemności poszczególnych ogniów względem uziemionej konstrukcji słupa i względem przewodu roboczego.



Rys. 2.3. Schemat zastępczy łańcucha izolatorów

W schemacie zastępczym łańcucha (rys. 2.3) musimy zatem uwzględnić, oprócz pojemności własnych ogniów C , również pojemności ogniów względem ziemi C_1 oraz pojemności ogniów względem przewodu roboczego C_2 . Zwykle przyjmuje się, że wartości tych pojemności nie zmieniają się wzdłuż długości łańcucha. W rzeczywistości pojemności C_1 zwiększają się w miarę

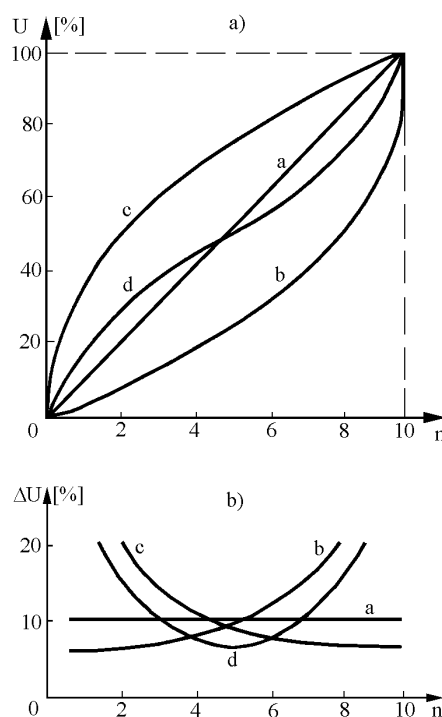
przybliżania do uziemionego końca łańcucha, a pojemności C_2 zwiększają się w miarę przybliżania do przewodu roboczego. Zmiany tych pojemności nie są duże, w związku z czym powyższe uproszczenie nie prowadzi do dużych błędów. Do dowolnego węzła układu z rys. 2.3 dopływa prąd płynący przez pojemność szeregową C oraz pojemność C_2 , odpływa zaś prąd płynący przez następną pojemność C i pojemność C_1 . Jeżeli $i_{C1} \neq i_{C2}$, prąd płynący przez każdą pojemność szeregową jest inny, powoduje na niej inne spadki napięcia i w efekcie rozkład napięcia na łańcuchu izolatorów jest nierównomierny.

Aby wyjaśnić wpływ pojemności C_1 i C_2 na rozkład napięcia wzdłuż łańcucha izolatorów, rozpatrzmy, co dzieje się w węźle A (rys. 2.3). Do węzła dopływają prądy i_{C2} i $i_{C'}$, odpływają zaś i_{C1} i $i_{C''}$. Jeżeli $i_{C2} \neq i_{C1}$ to $i_{C'} \neq i_{C''}$ i na pojemności C powyżej węzła odłoży się inna wartość napięcia, niż na pojemności C poniżej węzła. Wytworzy się zatem nierównomierny rozkład napięcia, przy czym jego przebieg będzie zależał od stosunku C_1/C i C_2/C . Rozkład napięcia wzdłuż izolatora byłby równomierny, jeżeli prąd i_{C2} byłby równy i_{C1} , czyli $i_{C'}$ byłby równy $i_{C''}$.

Łączny wpływ C_1 i C_2 powoduje pewne wyrównanie rozkładu napięcia, jednak nawet przy $C_1 = C_2$ nie uzyskuje się rozkładu jednostajnego. Na rys. 2.4 przedstawiono rozkład napięcia względem ziemi oraz napięcia na poszczególnych ogniwach w następujących przypadkach szczególnych:

- | | |
|------------------|---------------|
| a) $C_1 = 0,$ | $C_2 = 0,$ |
| b) $C_1 \neq 0,$ | $C_2 = 0,$ |
| c) $C_1 = 0,$ | $C_2 \neq 0,$ |
| d) $C_1 = C_2.$ | |

Wartości napięć wyrażono w procentach napięcia przyłożonego do łańcucha izolatorów.



Rys. 2.4. Rozkład napięcia na łańcuchu izolatorów:

- a) rozkład napięcia względem ziemi
b) rozkład napięcia na poszczególnych ogniwach

W łańcuchu izolatorów przeważa zwykle wpływ pojemności doziemnych ($C_1 = 4...5$ pF, $C_2 = 0.5...1$ pF) i największe napięcie przypada na ogniwo znajdujące się w sąsiedztwie przewodu, a mniejsze na ogniwo znajdujące się w pobliżu uziemionego końca łańcucha.

Miarą niejednostajności rozkładu napięcia wzdłuż łańcucha izolatorów jest stosunek największej ($U_{\max}$) do najmniejszej ($U_{\min}$) wartości napięcia na ogniwach. Im liczba ogniw w łańcuchu jest większa, tym rozkład napięcia jest bardziej niejednostajny. W tabeli 2.2 zestawiono wyniki obliczeń dla łańcuch złożonego z 7, 10 i 15 ogniw, przyjmując następujące przeciętne wartości pojemności: $C = 70$ pF, $C_1 = 5$ pF, $C_2 = 1$ pF.

Tabela 2.2. Wartości maksymalne i minimalne napięcia w łańcuchach izolatorów o różnej liczbie ogniw

Lp	Liczba ogniw w łańcuchu	$U_{\max}$	$U_{\min}$	$\frac{U_{\max}}{U_{\min}}$
		[%]	[%]	-
1	7	24	10	2.4
2	10	20	6	3.3
3	15	16	2	8.0

Niejednostajność rozkładu napięcia jest zjawiskiem niepożądanym, gdyż utrudnia pełne wykorzystanie izolacji ogniw, szczególnie w bardzo długich łańcuchach. Wytrzymałość łańcucha nie jest równa sumie wytrzymałości wszystkich ogniw, jakby to miało miejsce w przypadku jednostajnego rozkładu napięcia, lecz jest od tej sumy mniejsza. W tabeli 2.3 podano napięcia przeskoku dla łańcuchów izolatorów typu K 280/170 o różnej liczbie ogniw.

Tabela 2.3. Wartości napięcia przeskoku dla łańcucha izolatorów o różnej liczbie ogniw

Lp	Napięcie przeskoku izolatorów	Liczba ogniw w łańcuchu izolatora			
		1	5	10	20
1	Przy 50 Hz pod deszczem [kV_{sk}]	55	245	455	875
2	Przy 50 Hz na sucho [kV_{sk}]	80	330	615	1080
3	Udarowe biegunowość + [kV_m]	140	500	950	1620
4	Udarowe biegunowość – [kV_m]	146	522	993	1901



W celu ujednolinitenia rozkładu napięcia stosuje się na łańcuchach izolatorów wiszących specjalną armaturę w kształcie pierścieni otaczających łańcuch na pewnej wysokości nad przewodem roboczym, dołączonym do tego przewodu. Armatura ta zwiększa pojemność C_2 , a ponadto przez zmianę wysokości zawieszenia nad przewodem roboczym pozwala na dobór najkorzystniejszego rozkładu pojemności C_2 wzdłuż łańcucha izolatorów.

Rozważmy jak powinny zmieniać się wzdłuż długości łańcucha pojemności C_2 , aby rozkład napięcia był jednostajny. Łatwo zauważyć, iż rozkład napięcia wzdłuż łańcucha będzie jednostajny, jeśli zostanie zachowana dla kolejnego ogniwa równość prądów dopływających przez pojemność C_2 i odpływających przez pojemność C_1 . Stosując oznaczenia podane na rys. 2.5, dla dowolnego k -tego ogniwa z warunku równości prądów ($I_{1k} = I_{2k}$) otrzymujemy:

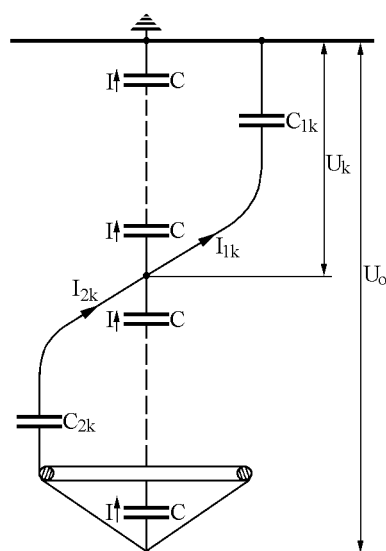
$$C_{2k} = C_{1k} \cdot \frac{1}{\frac{n}{k} - 1}$$

gdzie: n – liczba ogniw w łańcuchu.

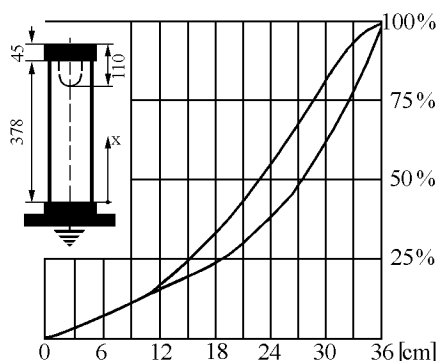
Dokładne spełnienie tego warunku wymagałoby armatury o bardzo złożonych kształtach, trudnej do wykonania i stosowania. W praktyce zadawała nas zwykle już częściowe wyrównanie rozkładu napięcia, jakie uzyskujemy przez zastosowanie armatury w kształcie pierścieni.

Często podobną armaturę stosuje się również na uziemionym końcu łańcucha izolatorów. Armatura ta praktycznie nie wpływa na rozkład napięcia. Jej rola, wspólnie z armaturą przy przewodzie roboczym polega na ochronie izolatorów przed cieplnym działaniem łuku elektrycznego. Wymaga się bowiem, aby przeskok spowodowany przepięciem i następujący po nim łuk zasilany napięciem roboczym pozostawał w bezpiecznej odległości od izolatora.

Rozkład napięcia wzdłuż łańcucha izolatorów w dużym stopniu zależy od warunków atmosferycznych i stanu powierzchni izolatorów. Przy zawilgoconej i



Rys. 2.5. Schemat zastępczy łańcucha izolatorów ze sterowaniem pojemnością C_2



Rys. 2.6. Rozkład napięcia wzdłuż powierzchni izolatora wsporcze

zanieczyszczonej powierzchni, w deszczu lub mgie rozkład napięcia będzie uwarunkowany przede wszystkim przez przewodności powierzchniowe izolatorów, a nie przez ich pojemności. Ponadto wskutek ulotu występującego na okuciach ogniów i związanego z nim przepływu dodatkowych prądów, rozkład napięcia przy napięciach bliskich napięciu przeskoiku może różnić się znacznie od rozkładu przy napięciu roboczym.

W czasie eksploatacji ogniwa izolatorów wiszących ulegają uszkodzeniom wskutek przeciążenia mechanicznego,

odprysków szkliwa, przenikania wilgoci do porów porcelany itp. Ujawnienie w linii we właściwym czasie uszkodzonych izolatorów i wymiana ich na nowe ma duże znaczenie dla bezawaryjnej eksploatacji linii. Zwykle izolatory kontroluje się między 3 a 4 rokiem eksploatacji. Kontrola ta między innymi polega na pomiarze rozkładu napięcia na poszczególne ogniwa w łańcuchu izolatorów. Pomiaru tego można dokonać za pomocą woltomierza elektrostatycznego prostej konstrukcji, umocowanego na końcu drążka izolacyjnego i połączonego z izolowanymi od siebie widelkami umożliwiającymi dotknięcie równocześnie górnego i dolnego okucia ogniwa w czasie, gdy linia jest pod napięciem. Brak wychYLENIA wskazówki oznacza, że ogniwo albo jest przebite, albo jego powierzchnia jest zabrudzona przewodzącymi osadami.

Wadą tej metody pomiaru jest duża pracochłonność, gdyż wymaga ona wchodzenia na każdy słup i pomiaru rozkładu napięcia na każdym łańcuchu izolatorów. Dogodniejsza jest metoda polegająca na pomiarze poziomu zakłóceń radioelektrycznych. Dla wykonania pomiaru rozkładu napięcia wchodzi się tylko na słupy, które wykazują nadmierne zakłócenia.

Badanie rozkładu napięcia wzdłuż łańcuchów izolatorów w laboratorium przeprowadza się najczęściej metodami kompensacyjnymi. W metodach kompensacyjnych nie pobiera się prądu z badanego układu, dzięki czemu pomiar może być przeprowadzony bardzo dokładnie.

1.3. Rozkład napięcia wzdłuż powierzchni izolatora wsporczego

Rozkład napięcia wzdłuż powierzchni izolatora wsporczego, podobnie jak w przypadku izolatorów wiszących, jest niejednostajny. Rozkład napięcia wzdłuż powierzchni dielektryku ma znaczny wpływ na wytrzymałość powierzchniową układu izolacyjnego. Wytrzymałość ta jest tym większa, im rozkład napięcia jest bardziej równomierny. W celu wyrównania rozkładu napięcia stosuje się odpowiednie ukształtowanie elektrod. Dla przykładu na rys.2.6 przedstawiono rozkład napięcia wzdłuż powierzchni izolatora wsporczego bez ekranowania (wykres a) i z ekranowaniem (wykres b) górnej części izolatora przez umieszczenie pod kołpakiem wnęki połączonej galwanicznie z okuciem.

Wskutek znacznego obniżenia maksymalnej wartości gradientu napięcia w pobliżu kołpaka (o około 70 %) zwiększono wytrzymałość tego izolatora na przeskok ze 172 kV (bez ekranowania) do 192 kV (z ekranowaniem), a więc o 20 kV.

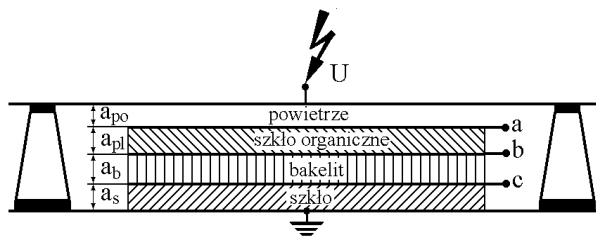
Bezpośredni pomiar rozkładu napięcia wzdłuż powierzchni izolatora nie jest możliwy ze względu na bardzo małą jego pojemność własną. Dołączenie np. woltomierza elektrostatycznego o stosunkowo dużej pojemności (rzędu kilku pF) zmieniłoby ów rozkład napięcia. Aby uniknąć tego rodzaju błędów, do pomiaru rozkładu napięcia wzdłuż powierzchni izolatorów wsporczych stosuje się metody kompensacyjne.

2. POMIARY

2.1. Pomiar rozkładu napięcia w układzie płaskim uwarstwionym szeregowo

Schemat połączeń





Rys. 2.7. Obiekt badań: układ płaski uwarstwiony szeregowo
 $a_{po} = 2 \text{ cm}$, $a_{pl} = 2 \text{ cm}$, $a_b = 0.8 \text{ cm}$, $a_s = 1 \text{ cm}$

Sposób wykonania pomiaru

Pomiar rozkładu napięcia należy wykonać przy napięciu przemiennym i stałym, przy wartościach napięcia podanych przez prowadzącego ćwiczenie. Do pomiaru wysokiego napięcia U doprowadzonego do badanego układu oraz do pomiaru napięć na zaciskach a, b i c wykorzystać woltomierz elektrostatyczny.

Opis działania woltomierza elektrostatycznego podany jest w pierwszej części skryptu. Każdy z pomiarów wykonać trzykrotnie, przyjmując wartość średnią arytmetyczną jako wynik pomiaru. Wyniki pomiarów zestawić w tabeli.

Opracowanie wyników pomiaru

1. Należy na podstawie wyników pomiarów rozkładu napięcia obliczyć napięcia ΔU oraz natężenia pola E w każdej warstwie izolacji, zarówno przy napięciu stałym jak i przemiennym.
2. Należy obliczyć wymienione powyżej wielkości z wzorów analitycznych.
3. Wykonać dwa wykresy, przy czym należy:
 - na jednym wykresie zamieścić rozkład natężeń pomierzonych i obliczonych przy napięciu stałym i przemiennym (4 zależności),
 - na drugim wykresie zamieścić rozkład napięć pomierzonych i obliczonych przy napięciu stałym i przemiennym (4 zależności).
4. Krytyka pomiaru.

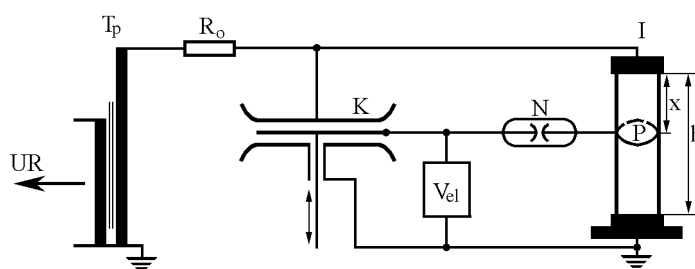
Podczas pomiaru napięcia przemiennego i napięcia stałego na zaciskach a, b, c badanego układu mogą powstać pewne uchyby pomiarowe związane z pojemnością i przewodnością własną woltomierza elektrostatycznego. Dokładność pomiaru napięcia na zaciskach a, b i c jest tym większa, im pojemność i przewodność własna izolacji woltomierza elektrostatycznego jest mniejsza. Ponadto pewne rozbieżności wyników pomiarów i obliczeń wykonanych według wzorów

podanych we wstępie może być spowodowana przez efekty krawędziowe oraz przez upływ części prądu po powierzchniach bocznych płyt izolacyjnych, szczególnie gdy są one zanieczyszczone a wilgotność powietrza jest duża.

W celu oszacowania dokładności pomiarów należy obliczyć i podać w sprawozdaniu uchyb pomiaru napięcia przemiennego względem ziemi na zacisku a. W obliczeniach pojemności zaniedbać zjawiska krawędziowe. Pojemność własną woltomierza elektrostatycznego przyjąć równą 15 pF.

2.2. Pomiar rozkładu napięcia wzdłuż łańcucha izolatorów

Schemat połączeń



Rys. 2.8. Schemat układu do pomiaru rozkładu napięcia metodą kompensacyjną

UR – układ regulacji napięcia, *T_p* – transformator probierczy, *R_o* – rezystor ograniczający, *K* – kondensator trójelektrodowy z ruchomą elektrodą środkową, *N* – neonówka, *V_{el}* – woltomierz elektrostatyczny, badany izolator

Sposób wykonania pomiaru

Pomierzyć rozkład napięcia wzdłuż łańcucha izolatorów z pierścieniem ochronnym i bez pierścienia. Dokonując pomiaru napięcia w wybranym punkcie należy przyłożyć do łańcucha izolatorów określoną wartość napięcia. Podczas podnoszenia wartości napięcia zachodzi konieczność wstępnej kompensacji układu (przez zmianę położenia środkowej elektrody kondensatora *K*). Nie można bowiem dopuścić do wystąpienia zbyt dużej wartości napięcia na neonówce (silne świecenie), aby jej nie uszkodzić. Każdy pomiar wykonać dwukrotnie, odczytując największą i najmniejszą wartość napięcia wskazywaną przez woltomierz elektrostatyczny przy zgaszonej neonówce.

Wyniki pomiarów zestawić w tabeli.

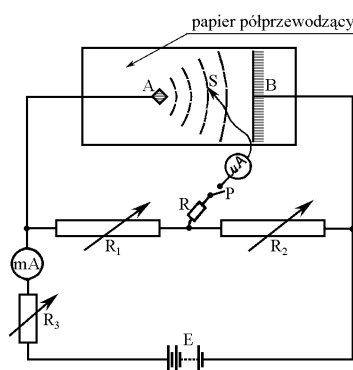
Opracowanie wyników pomiaru

Na podstawie wyników pomiaru wykonać na wspólnym rysunku wykres rozkładu napięcia względem ziemi oraz napięcia przypadającego na poszczególne ogniwa w przypadku łańcucha izolatorów z pierścieniem ochronnym i bez pierścienia.

2.3. Wyznaczenie obrazu pola elektrycznego

2.3.1. Wyznaczenie obrazu pola elektrycznego przy użyciu papieru słabo przewodzącego

Schemat połączeń



Rys. 2.9. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania rozkładu natężenia pola na papierze półprzewodzącym

A, B – elektrody, S – sonda, R_1, R_2, R_3 – rezystory regulacyjne, R – rezystor stały, P – przełącznik, $mA, \mu A$ – przyrządy do pomiaru prądu, B – bateria napięcia

Sposób wykonania pomiaru

Posługując się papierem półprzewodzącym należy, dla układu elektrod wskazanego przez prowadzącego ćwiczenie, wyznaczyć linie ekwipotencjalne ($6 \div 10$ linii) w płaszczyźnie stanowiącej przekrój poprzeczny elektrod.

Opracowanie wyników pomiaru

1. W sprawozdaniu należy zamieścić papier półprzewodzący z naniesionymi liniami ekwipotencjalnymi.

2. Na papierze tym należy wskazać drogę, wzdłuż której wystąpienie przeskoku jest najbardziej prawdopodobne oraz wskazać obszar najsilniej zagrożony wyładowaniami niezupełnymi. Wykreślić wzdłuż wskazanej drogi $E = f(x)$ wyrażając $E = \frac{E_x}{E_{\max}} \cdot 100\%$.
3. Określić największą wartość skuteczną napięcia przemiennego, jaką można przyłożyć do układu bez obawy, że wystąpią na nim wyładowania niezupełne.

2.3.2. Wyznaczenie obrazu pola elektrycznego na komputerze przy użyciu programu *Quick-Field*.

Sposób realizacji zadania poda prowadzący ćwiczenie.

Opracowanie wyników pomiaru

4. W sprawozdaniu należy umieścić wydruk konturów elektrod z liniami ekwipotencjalnymi i linią pola, wzdłuż której najprawdopodobniej nastąpiłby przeskok.
5. Zamieścić wydruk zmian natężenia pola E wzdłuż tej linii. Na podstawie tego wykresu narysować krzywą:
$$E = \frac{E_x}{E_{\max}} \cdot 100\%$$
6. Nanieść tą krzywą na podobny wykres z p.2.3.1.
7. Odczytać największą wartość natężenia pola w układzie (przy rogu elektrody wysokiego napięcia).
8. Na podstawie wartości odczytanej w p. 4 obliczyć najwyższą wartość napięcia przemiennego, jakie można doprowadzić do układu elektrod bez obawy, że wystąpią w nim wyładowania niezupełne.

3. UWAGI I WNIOSKI



ĆWICZENIE 3

BADANIE IZOLATORÓW

1. WIADOMOŚCI OGÓLNE

1.1. Klasyfikacja izolatorów

Izolatory służą do izolowania przewodów oraz różnych elementów urządzeń elektrycznych i elektroenergetycznych znajdujących się pod napięciem w stosunku do ziemi lub innych punktów odniesienia. Klasyfikacja izolatorów przeprowadzona jest według różnych kryteriów, ustalanych w zależności od celu jakiemu ma służyć i jest w pewnym sensie umową, ułatwiającą porozumiewanie się stron biorących udział w procesie projektowania, budowy i eksploatacji urządzeń oraz obiektów elektroenergetycznych. Wysokonapięciowe izolatory elektroenergetyczne klasyfikowane są w oparciu o normę PN-84/E-02051. Norma ta jednak nie obejmuje całości problemu. Dotyczy ona głównie izolatorów ceramicznych natomiast brak jest w niej odniesienia do nowoczesnych izolatorów kompozytowych (izolatorów nieceramicznych). Norma ta, jak również inne normy dotyczące izolatorów, będzie w najbliższych latach znowelizowana i zgodna z postanowieniami norm Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej (IEC).

W odniesieniu do izolatorów ważnym kryterium podziału jest miejsce jakie izolacja zajmuje w urządzeniu i w środowisku. Z tego punktu widzenia mamy:

- 1. izolację wewnętrzną,**
- 2. izolację zewnętrzną.**

Izolacja wewnętrzna umieszczona jest w obudowie aparatu, w jego wnętrzu, w związku z tym nie oddziałują na nią czynniki atmosferyczne.

Izolacja zewnętrzna dzieli się na:

- a) izolację wewnętrzną,**
- b) izolację napowietrzną.**

Izolacja zewnętrzna, zarówno wewnętrzna jak i napowietrzna wystawiona jest zawsze na działanie czynników atmosferycznych, przy czym w najtrudniejszych



warunkach pracy znajduje się izolacja napowietrzna, gdyż narażona jest na działanie deszczu, mgły, zabrudzeń, znacznych wahań temperatury, wiatru itp.

Izolacja zewnętrzna jest podstawowym rodzajem izolacji napowietrznych linii i stacji elektroenergetycznych. Ćwiczenie poniższe poświęcone jest omówieniu własności, budowy, zasad doboru i eksploatacji różnych konstrukcji izolatorów stosowanych w układach elektroenergetycznych wysokiego napięcia oraz przeprowadzeniu podstawowych prób i pomiarów wybranych izolatorów. Zatem dalszy opis dotyczy przede wszystkim izolacji zewnętrznej.

Ze względu na zakres pracy rozróżnia się:

1. izolatory niskonapięciowe (napięcie do 1 kV),
2. izolatory wysokonapięciowe (napięcie powyżej 1 kV).

Izolatory niskonapięciowe są stosowane: w liniach elektroenergetycznych jako izolatory stojące, szpulowe i bezpiecznikowe; w rozdzielniach i aparatach jako izolatory przepustowe. Znaczącą grupę izolatorów niskonapięciowych stanowią tzw. części izolacyjne. Znajdują one zastosowanie w różnych urządzeniach elektrycznych i obejmują bardzo liczną grupę form konstrukcyjnych, takich jak: gniazda bezpiecznikowe, bezpieczniki, cokoły wyłączników, podstawki, oprawy lamp, tulejki itp.

Izolatory wysokonapięciowe są przeznaczone do oddzielania i mocowania w różny sposób przewodów, szyn i elementów urządzeń w układach elektroenergetycznych o napięciu powyżej 1 kV. Izolatory te są również elementem mechanicznym konstrukcji układu elektroenergetycznego, muszą zatem oprócz odporności elektrycznej posiadać odpowiednią wytrzymałość mechaniczną.

Ze względu na rodzaj konstrukcji i wytrzymałość elektryczną izolatory dzieli się na:

1. przebijalne,
2. nieprzebijalne.

Do izolatorów przebijanych, z punktu widzenia konstrukcji, zalicza się izolatory, których droga przebicia jest mniejsza od połowy drogi przeskoku, zaś do izolatorów nieprzebijalnych te, których droga przebicia jest równa lub większa od połowy drogi przeskoku.

Wykonania specjalne, ze względu na elektryczną wytrzymałość powierzchniową, mają izolatory przeciwbabrudzeniowe, przeznaczone do pracy w okręgach przemysłowych i nadmorskich.

W tradycyjnym ujęciu zasada klasyfikacji izolatorów elektroenergetycznych zawarta jest w normie E-02051 (patrz Tabela 3.1). Przedmiotem normy są nazwy i określenia oraz podział i oznaczenia izolatorów na napięcie powyżej 1 kV. Stosownie do zadań, jakie spełniają w eksploatacji, izolatory wysokiego napięcia dzieli się na pięć grup: **L** - liniowe, **S** - stacyjne, **P** - aparatowe przepustowe, **O** -



aparaturowe osłony, **R** - aparaturowe różne. W każdej grupie występuje wiele rozwiązań konstrukcyjnych np. mamy izolatory z okuciami zewnętrznymi lub wewnętrznymi, z kłozami o jednakowej średnicy lub o przemiennej zmiennej średnicy, z kłozami prostymi lub o rozwiniętej powierzchni dolnej itp. Z tego powodu izolatory podzielono na rodzaje, np. **S** - stojące, **W** - wsporcze, **T** - trakcyjne, **K** - wiszące kołpakowe, **P** - wiszące pniowe itd.

Poszczególne cechy izolatorów są podawane w tzw. wyróżniku. Pełne oznaczenie składa się z części słownej **IZOLATOR** i wyróżnika złożonego z zespołu liter charakteryzujących typ izolatora oraz zespołu liter i liczb charakteryzujących szczegóły konstrukcyjne i wielkości znamionowe. Izolatory spełniające zalecenia norm IEC są dodatkowo oznaczone w kartach katalogowych wyróżnikami podanymi w tych zaleceniach.

Przykłady oznaczeń klasyfikacyjnych:

1. **IZOLATOR LSP 20** - izolator liniowy (L), stojący (S), pniowy (P), napięcie znamionowe 20 kV,

2. **IZOLATOR SWZP4/110/550** - izolator stacyjny (S), wsporczy (W), przeciwzabrudzeniowy (Z), pniowy (P), wytrzymałość mechaniczna na zginanie 4 kN (4), napięcie znamionowe 110 kV (110), udarowe napięcie probiercze 550 kV (550).

1.2. Wymagania stawiane izolatorom

Izolatory podczas eksploatacji podlegają działaniom różnych czynników zewnętrznych na które powinny być odporne. Do głównych, decydujących o doborze izolatorów, należy zaliczyć:

- narażenia elektryczne,
- narażenia mechaniczne,
- narażenia cieplne,
- narażenia atmosferyczne.



Tabela 3.1. Podział izolatorów i elementy wyróżników oznaczenia

Grupa izolatorów	Rodzaj izolatorów	Typ			Budowa ³⁾	Wielkości znamionowe						
		Wnętrzone	Napowietrzne	Przeciwnozabrudzeniowe		Wytrzymały ⁴⁾	Wytrzymałość mechaniczna ⁵⁾	Okucia ⁶⁾	Napięcie znamionowe [kV]	Uda rowe napięcie przebierze ⁷⁾ [kV]	Prąd znamionowy [A]	Inne oznaczenia w zależności od potrzeb ⁸⁾
		W	N	Z		a	b	c	d	e	f	g
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
L liniowe ¹⁾	S stojące K wiszące kołpakowe P wiszące pniowe T trakcyjne	- - - -	- - - -	- x x -	x x x -	- x x -	- - - -	- x x -	x - - -	- - - -	- - - -	Śr, S
S stacyjne ¹⁾	W wsporcze P przepustowe	- -	x x	x x	x x	- -	- x	- x	- x	x x	- x	
P przepusty aparatowe- ²⁾	T transformatorowe P przekładnikowe W wyłącznikowe C kondensatorowe	x - - -	- x x x	x x x x	x x x x	- - - -	- - - -	x - - -	x x x x		x x x x	
O osłony izolacyjne ²⁾	K kablowe T transformatorowe P przekładnikowe W wyłącznikowe G odgromnikowe C kondensatorowe	w zależności od potrzeb										
R Różne aparatowe	B rury bezpiecznikowe różne inne	w zależności od potrzeb										
Znak x oznacza, że wartości te należy stosować w oznaczeniu w kolejności jak podano w tabeli Izolatory liniowe stojące i wiszące oraz izolatory stacyjne z okuciami zmontowanymi fabrycznie Izolatory aparatowe obejmują tylko część izolacyjną, jeśli normy przedmiotowe nie przewidują inaczej, wykonaną łącznie z okuciami Oznacza budowę: D – konstrukcję o kształcie litery delta P – pniową nieprzebijalną K – konstrukcję kondensatorową R – konstrukcję wielorurową O – konstrukcję olejową Podaje się średnicę pnia, średnicę klosza, skok i liczbę kloszy Wytrzymałość mechaniczną na zginanie izolatorów stacyjnych oznacza się przez podanie symbolu literowego, odpowiadającego sile łamiącej: dla izolatorów stacyjnych wewnętrznych: A – 400 kG, B – 800 kG, C – 1200 kG, D – 3000 kG; dla izolatorów stacyjnych napowietrznych: P – 225 kG, Q – 450 kG, R – 900 kG; Okucia dotyczą kształtu stopy izolatora wsporcze lub kołnierza izolatora przepustowego: stosuje się następujące oznaczenia: O – okrągły, E – owalny, K – kwadratowy Dotyczy izolatorów na napięcia znamionowe 110 kV i wyższych Dotyczy kształtu kloszy: Śr – klosze spiralne, S – klosze schodkowe												



Narażenia elektryczne pochodzą od napięcia roboczego oraz przepięć atmosferycznych i łączeniowych. W normalnych warunkach pracy, w trójfazowym układzie elektroenergetycznym, izolator znajduje się pod działaniem napięcia fazowego o częstotliwości sieciowej 50 Hz i wartości $\frac{U_m}{\sqrt{3}}$ (U_m - najwyższe dopuszczalne napięcie robocze, wartość skuteczna napięci międzyprzewodowego sieci, o $5 \div 20$ % wyższe od napięcia znamionowego sieci U_n). W pewnych przypadkach (np. przy zwarciu doziemnym w sieciach z izolowanym punktem zerowym lub w sieciach skompensowanych) izolator może znajdować się przez dłuższy czas pod działaniem napięcia U_m . W sieciach ze skutecznie uziemionym punktem zerowym przyjmuje się, że izolator może znajdować się podczas zwarcia doziemnego w stanie ustalonym pod wpływem napięcia $0.8 U_m$. Oprócz tego izolatory mogą znajdować się pod działaniem krótkotrwałych przepięć piorunowych i łączeniowych. Amplitudy tych przepięć znacznie przewyższają wartości napięcia roboczego i dlatego głównie one decydują o wymiarach elektroenergetycznych układów izolacyjnych.

Dostosowanie wytrzymałości elektrycznej izolatorów do najwyższych wartości przepięć występujących w eksploatacji, stwarzałoby bardzo duże wymagania pod względem materiałowym i konstrukcyjnym, a to z kolei spowodowałoby znaczny wzrost kosztów izolatorów i budowy układów elektroenergetycznych. Dlatego stawia się wymagania, aby izolatory wytrzymywały bez przeskoków i przebić większość przepięć łączeniowych i zwarciovych, natomiast dla zabezpieczenia izolatorów od przepięć atmosferycznych oraz ich skutków stosuje się środki ochrony odgromowej i przeciwłukowej.

Zagrożenie izolatorów w funkcji napięcia znamionowego jest różne (rys. 3.1). Dla napięć niższych, w zakresie do 220 kV można przyjąć, że decydujące znaczenie mają wyładowania piorunowe. W miarę wzrostu napięcia sieciowego maleje udział zakłóceń burzowych natomiast wzrasta udział zakłóceń zabrudzeniowych. Ze wzrostem napięcia zwiększa się także zagrożenie pochodzące od przepięć łączeniowych (przy odstępach izolacyjnych powyżej 3 metrów).

Wszystkie izolatory napowietrzne podlegają oddziaływaniu czynników środowiskowych. Z tego punktu widzenia istnieje w problematyce izolacyjnej układów elektroenergetycznych wyodrębnione zagadnienie wytrzymałości elektrycznej izolatorów ze względu na narażenia zabrudzeniowe. Zagrożenie awaryjne izolacji napowietrznej powodowane zabrudzeniem powierzchni izolatorów odznacza się tym, że potencjalnie istnieje ciągle, a ujawnia się tylko w niektórych okolicznościach. Narażenie zabrudzeniowe polega na równoczesnym oddziaływaniu zanieczyszczeń i wilgoci. Zagrożenie awaryjne izolatorów zależy nie tylko od natężenia opadów zanieczyszczeń i zawartości niektórych gazów w

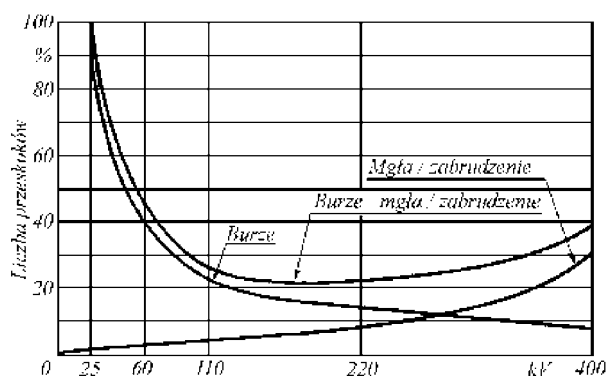


otaczającym izolator powietrzem ale również od tych właściwości zanieczyszczeń, które decydują o przewodnictwie osadów na powierzchni izolatora. Stwarza to duże trudności w ocenie narażenia zabrudzeniowego izolatorów oraz ich doborze do tych zagrożeń. Powszechnie przyjmuje się jako miarę narażenia zabrudzeniowego wartość konduktywności powierzchniowej izolatora.

Dla danej konduktywności wytrzymałość zabrudzeniowa izolatora zależy od długości drogi upływu. Z tego powodu przyjmuje się jako kryterium doboru zabrudzeniowego długość drogi upływu izolatora i najwyższego napięcia roboczego urządzenia (norma PN-79/E-06303). Innym kryterium doboru może być charakterystyka zabrudzeniowa izolatora. Jest to zależność pięćdziesięcioprocentowego napięcia przeskoku zabrudzeniowego od konduktywności powierzchniowej ($U_{pz50} = f(\kappa)$). To kryterium doboru dopuszczalne jest również przez normę PN-79/E-06303, przy czym dla określonej wartości konduktywności κ , 50-procentowe napięcie przeskoku zabrudzeniowego powinno spełniać warunek: $U_{pz} > 0.9U_m$. Jako równoważną podstawę doboru izolatorów można przyjąć zamiast U_{pz} napięcie wytrzymywane U_w , wyznaczone w próbie zabrudzeniowej, o wartości $U_w > 1.3 \frac{U_m}{\sqrt{3}}$.

Uwzględniając wszystkie narażenia elektryczne, izolatory mają przypisane odpowiednie wartości napięć probierczych dla poszczególnych napięć znamionowych sieci, które układ izolacyjny musi wytrzymać (tab. 3.2).

Narażenia mechaniczne izolatorów, ze względu na źródło pochodzenia, można podzielić na obciążenia elektrodynamiczne oraz obciążenia natury nieelektrycznej. Siły powodowane obciążeniami mechanicznymi w układzie elektroenergetycznym mogą działać statycznie, uderowo i wibracyjnie. W normie PN-88/E-06313 „Dobór izolatorów liniowych i stacyjnych pod względem wytrzymałości mechanicznej” obciążenia mechaniczne, występujące w liniach napowietrznych, dzieli się na:



Rys. 3.1. Wykres ilustrujący udział przeskoku zabrudzeniowych w ogólnej liczbie zakłóceń w zależności od napięcia znamionowego sieci, według statystyk zachodnio-europejskich



- **zewnętrzne** (zmienne), zalicza się do nich obciążenia wiatrowe, oblodzeniowe, oblodzeniowo-wiatrowe oraz obciążenia związane z występowaniem szczególnie niskich temperatur,
- **ciągłe**, pochodzące od naciągu przewodów i masy elementów linii,
- **specjalne**, są to obciążenia montażowe i zakłóceniove.

Tabela 3.2. Napięcia znamionowe sieci i odpowiadające im wartości napięć probierczych izolatorów

Napięcie znamionowe sieci [kV]	Najwyższe napięcie robocze urządzenia	Napięcie probiercze przemienne	Napięcie probiercze udarowe ¹⁾		Napięcie przeskołu zabrudzeniowego ²⁾	
			piorunowe	łączeniowe	50-procentowe	wytrzymywane
10	12	28	75	-	10.8	9.0
15	17.5	38	95	-	15.8	13.2
20	24	50	125	-	21.6	18.0
30	36	70	170	-	32.4	27.2
60	72.5	140	325	-	65.3	54.4
110	123	230	550	-	111.0	92.4
220	245	395	950	-	221.0	184.1
400	420	-	1425	1050	378.0	316.0
750	765	-	1950	1425	688.5	574.8
¹⁾ Najwyższe napięcie probiercze według normy PN-81/E-05001						
²⁾ Wartość napięcia obliczona według zależności podanych w normie PN-79/E-06303						

Obciążenia elektrodynamiczne, osiągając znaczne wartości przy dużych prądach zwarciovych, decydują głównie o doborze izolatorów w stacjach rozdzielczych i są to obciążenia natury zginającej lub skręcającej. Inne rodzaje obciążeń, natury rozciągającej (np. naciąg przewodów) decydują o doborze izolatorów liniowych. Podstawą doboru izolatorów ze względu na obciążenia mechaniczne według normy są współczynniki, ustalające zależności między obciążeniem rzeczywistym występującym w układzie a gwarantowanym dla izolatora, podanym przez wytwórcę jako parametr znamionowy.

Narażenia różne. W eksploatacji, na izolatory działa jeszcze, oprócz wymienionych wyżej, wiele innych czynników. W przypadku zakłóceń w układzie elektroenergetycznym na izolatory może oddziaływać ciepło łuku elektrycznego, powstałego wskutek przeskołu między przewodem a uziemionym okuciem izolatora. Izolacja ceramiczna jest odporna na działanie łuku elektrycznego tylko do pewnych granic. Na przykład prąd łuku o wartości 2.5 kA przy czasie trwania łuku 3.5 s powoduje już trwałe uszkodzenie w postaci pęknięć lub stopienia por-

celany. Środkiem zaradczym, prowadzącym do zmniejszenia omawianego niebezpieczeństwa, jest stosowanie szybko działających zabezpieczeń, powodujących wyłączenie w krótkim czasie uszkodzonego odcinka linii oraz stosowanie iskierników lub specjalnych armatur przeciwłukowych, których zadaniem jest odsunięcie łuku od powierzchni izolatora. Nagłe zmiany temperatury na powierzchni izolatora napowietrznego, powodowane nagrzaniem słońcem i oziębieniem przez grad lub zimny deszcz mogą spowodować jego pęknięcie. W przypadku izolatorów przepustowych występuje zagrożenie cieplne wewnętrznej części izolacyjnej wskutek strat dielektrycznych. Ten problem dotyczy wszystkich konstrukcji izolatorów z tzw. izolacją miękką (papier bakelizowany). Powyższa własność charakteryzowana jest przez podanie wartości prądu roboczego dla izolatorów przepustowych jako parametru znamionowego.

Aby izolatory mogły sprostać różnorodnym zagrożeniom występującym w eksploatacji, muszą być one już w fabryce poddane wszechstronnym badaniom. Wieloletnie doświadczenia pozwalają na ustalenie rodzaju i metod prób gwarantujących właściwą pracę izolatorów i ujęcie tych wymagań w formę norm państwowych, a obecnie norm zakładowych. Normy polskie dotyczące izolatorów wysokonapięciowych są identyczne, bądź zgodne z normami IEC. Normy przewidują trzy grupy badań izolatorów: badania typu, badania wyrobu i badania kontrolno-odbiorcze.

Dotychczasowe wymagania, dotyczące wytrzymałości przy napięciu przemiennym na sucho i pod deszczem oraz przy napięciu udarowym, w odniesieniu do izolatorów stosowanych w układach najwyższych napięć są niewystarczające. Istnieje wiele problemów, które należy uwzględnić przy konstruowaniu i doborze izolatorów linii napowietrznych. Zakres głównych wymagań technicznych, które powinny być brane pod uwagę obejmuje:

1. Wymagania elektryczne
wytrzymałość przy napięciu przemiennym,
wytrzymałość przy przepięciach piorunowych,
wytrzymałość przy przepięciach łączeniowych,
wytrzymałość przy zwiększonej upływności powierzchniowej,
poziom zakłóceń radioelektrycznych i akustycznych,
wytrzymałość na przebicie.
2. Wymagania mechaniczne
wytrzymałość mechaniczna,
wytrzymałość elektromechaniczna,
wytrzymałość dynamiczna.
3. Wymagania różne
odporność na nagłe zmiany temperatury,



odporność na działanie łuku elektrycznego,
odporność na wpływy otoczenia,
normalizacja wymiarów,
wytrzymałość materiału izolacyjnego,
ograniczenie zakresu prób wyrobu i badań profilaktycznych,
wymagania ekonomiczne.

1.3. Materiały stosowane do produkcji izolatorów

Izolatory zewnętrzne, ze względu na zastosowany materiał do ich budowy, można w uproszczeniu sklasyfikować w trzech grupach:

1. izolatory ceramiczne,
2. izolatory szklane,
3. izolatory z materiałów nieceramicznych (kompozytowe).

Porcelana techniczna, jako jeden spośród różnych materiałów ceramicznych, jest używana do wyrobu izolatorów elektroenergetycznych. Powszechne zastosowanie porcelany do budowy wysokonapięciowych izolatorów napowietrznych wynika z wielu bardzo korzystnych własności, jakie ona posiada, a mianowicie: małej wrażliwości na działanie czynników atmosferycznych, dużej wytrzymałości elektrycznej, łatwości nadawania kształtu izolatorom, nienasiąkliwości i szeregu innych. Surowce, z których produkuje się porcelanę są pochodzenia mineralnego. Głównymi składnikami tradycyjnej porcelany elektrotechnicznej są: kaolin, kwarc i skaień, na ogół w proporcjach wagowych 50%, 25% i 25%.

Rozwój przemysłu elektrotechnicznego i elektroenergetyki, przy jednoczesnym wzroście napięć sieciowych, wymaga stosowania coraz to doskonalszych materiałów izolacyjnych. Budowa aparatury na bardzo wysokie napięcia, budowa stacji i linii elektroenergetycznych uwarunkowana jest między innymi odpowiednią wytrzymałością mechaniczną i elektryczną izolatorów oraz ich odpornością na działanie czynników środowiskowych. Tradycyjna porcelana nie spełnia współczesnych coraz większych wymagań technicznych, głównie ze względu na niedostateczną wytrzymałość mechaniczną. W ostatnich latach na świecie i w kraju dokonano znacznego postępu w technologii wytwarzania materiałów ceramicznych. Izolatory produkowane obecnie z tzw. mas wysokoglinowych odznaczają się znacznie większą wytrzymałością mechaniczną niż tradycyjne. Według normy PN-86/E-06301 rozróżnia się cztery rodzaje porcelany do budowy izolatorów:

1. rodzaj 110 - porcelana elektrotechniczna,



2. rodzaj 112 - porcelana elektrotechniczna krystobalitowa,
3. rodzaj 120 - porcelana elektrotechniczna wysokoglinowa,
4. rodzaj 130 - porcelana elektrotechniczna wysokoglinowa o dużej wytrzymałości.

Wytrzymałość mechaniczna na zginanie porcelany 112 i 120 jest o 50% większa niż rodzaju 110, a porcelany 130 aż trzy razy większa.

W krajowych Zakładach Porcelany Elektrotechnicznej w Boguchwale obecnie produkuje się izolatory długopniowe i wsporcze wyłącznie z masy marki 130, dzięki czemu uzyskano parametry wytrzymałości mechanicznej izolatorów odpowiadające standardom światowym.

Izolatory szklane stosowane są głównie do izolowania linii niskiego i średniego napięcia. Szkło specjalne, o wysokiej mikrojednorodności, wysokotopliwe, nadające się do hartowania, jest w ostatnich latach dość często wykorzystywane do budowy izolatorów kołpakowych, mających zastosowanie w liniach najwyższych napięć. Szkło jest produkowane z surowców pochodzenia mineralnego i pod tym względem jest pokrewne do porcelany. Do produkcji wysokonapięciowych izolatorów elektroenergetycznych używa się szkła borowo-krzemowego, wytapianego w temperaturze przekraczającej 1600 °C. Niektóre własności szkła i porcelany podaje tabela 3.3.

Tabela 3.3 Porównanie niektórych własności szkła i porcelany

Własności materiału	Wymiar	Szkło	Porcelana
Stratność przy 50 Hz i 20 °C	-	0.015 ÷ 0.1	0.017 ÷ 0.025
Rezystywność skrośna	Ωcm	$8 \cdot 10^{11} \div 7 \cdot 10^{14}$	około 10^{13}
Rezystywność powierzchniowa	Ωcm/cm		
- przy 50% ww		$5 \cdot 10^{10}$	$6 \cdot 10^{11}$
- przy 70% ww		$6 \cdot 10^7$	$7 \cdot 10^9$
- przy 90% ww		$2 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$

Szklane izolatory kołpakowe pod względem wytrzymałości mechanicznej przewyższają izolatory porcelanowe o takiej samej budowie. Zaletą izolatorów ze szkła hartowanego jest również to, że nie wymagają badań profilaktycznych. W przypadku przebicia lub pęknięcia izolatory te rozsypują się, zachowując przy tym połączenie mechaniczne między okuciami. Izolatory szklane są mniej odporne od izolatorów porcelanowych na działanie aktywnych chemicznie zabrudzeń, wskutek czego ich powierzchnie łatwiej ulegają erozji. Poza tym ze szkła można wykonywać tylko elementy cienkościenne, a więc izolatory szklane są izolatorami przebijalnymi.



Izolatory kompozytowe obejmują obecnie liczną grupę wyrobów, produkowanych z różnych materiałów izolacyjnych, takich jak żywice epoksydowe, żywice poliestrowe, tworzywa polimerowe, włókna szklane, kauczuk silikonowy, teflon, elastomery i inne. Izolatory takie nazywane są potocznie izolatorami organicznymi. Nazwa ta nie jest ścisła, bowiem zawierają one różnego rodzaju wypełniacze pochodzenia mineralnego, np. mączkę kwarcową. Dlatego też tą grupę izolatorów, w odróżnieniu do izolatorów porcelanowych i szklanych, nazywa się często izolatorami z materiałów nieceramicznych. Ze względu na właściwości użytkowe konstrukcje tych izolatorów można podzielić na sztywne i elastyczne (dotyczy to głównie kloszy i elementów osłonowych).

Współczesne technologie pozwalają już na wytwarzanie izolatorów kompozytowych o bardzo dobrych właściwościach elektrycznych i mechanicznych. Znaczący postęp dokonany w ostatnich latach w sposobie produkcji tych izolatorów umożliwił budowę izolatorów napowietrznych do stosowania w liniach najwyższych napięć. Obecnie napowietrzne izolatory kompozytowe, oprócz wytrzymałości elektrycznej i mechanicznej, odznaczają się szeregiem bardzo korzystnych cech, takich jak: lekkością (około dziesięciokrotnie mniejszy ciężar niż łańcucha izolatorów porcelanowych), możliwością budowy pojedynczych izolatorów na dowolny poziom napięcia, odpornością na udary i wstrząsy, odpornością na doraźne zmiany narażeń zabrudzeniowych i trwałością hydrofobowości, łatwością montażu i dozoru eksploatacyjnego, a nawet odpornością na przejawy wandalizmu (np. zabawa w strącanie izolatorów szklanych i porcelanowych przez rzucanie kamieniami czy strzelanie z broni palnej).

Izolatory kompozytowe w warunkach napowietrznych znajdują zastosowanie jako:

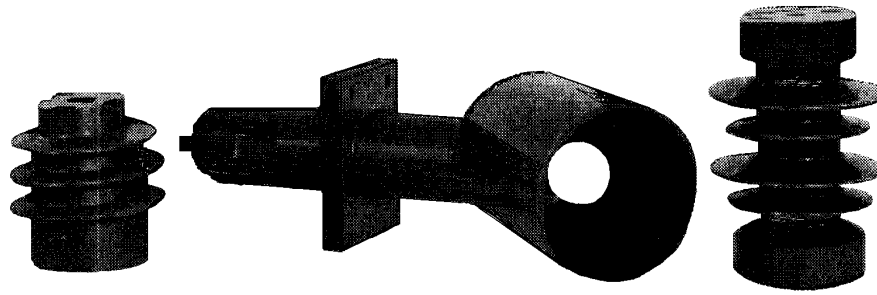
- izolatory liniowe wiszące, przelotowe i odciągowe,
- izolatory odporowe w poprzecznikach i liniach małogabarytowych,
- separatory przewodów roboczych w liniach o długich przęsłach,
- izolatory wsporcze stacyjne i aparatowe,
- izolatory przepustowe,
- osłony izolacyjne ograniczników przepięć.

Znaczący postęp w budowie wysokonapięciowych izolatorów kompozytowych dokonał się w latach 80-tych, głównie w Stanach Zjednoczonych. Izolacja tego rodzaju w USA wykorzystywana jest w liniach przesyłowych najwyższych napięć.

Początkowo, w latach 60-tych, materiały nieceramiczne były stosowane w urządzeniach elektrycznych niskiego i średniego napięcia jako izolatory wewnętrzne. Obecnie izolatory te są budowane głównie z żywic lanych i znalazły szerokie zastosowanie w krajowych układach elektroenergetycznych średnich

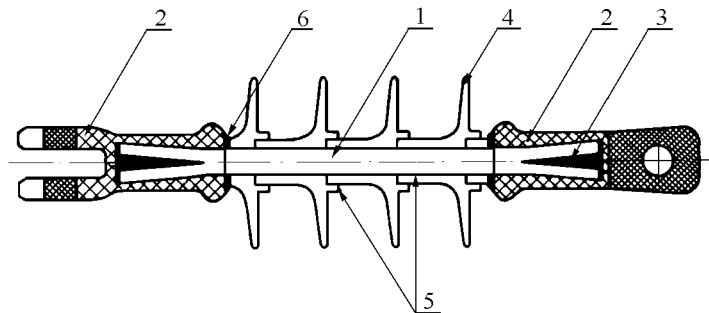


napięć, jako izolatory wsporcze, przepustowe oraz elementy konstrukcyjno-izolacyjne aparatów elektrycznych (rys.3.2).



Rys.3.2. Przykładowe konstrukcje izolatorów z żywic lanych

Przykład tradycyjnej konstrukcji długopniowego izolatora kompozytowego pokazano na rysunku 3.3. Izolator taki składa się z trzech zasadniczych elementów: rdzenia nośnego, osłony i okuć. Niezbędną wytrzymałość mechaniczną uzyskuje się za pomocą elektroizolacyjnych elementów nośnych, trwale połączonych z metalowymi okuciami. O wytrzymałości elektrycznej izolatora decydują elementy równoległego układu izolacyjnego: rdzeń, osłona i kłosze oraz sposób ich połączenia. Do produkcji prętów nośnych stosuje się włókna szklane o średnicy od 5 do 20 μm , wytwarzane ze szkła o dużej rezystywności (np. szkło borowo-krzemowe).



Rys.3.3. Widok izolatora kompozytowego w przekroju
1-rdzeń szklano-epoksydowy, 2-okucia, 3-klin metalowy, 4-kłosze osłonowe, 5-smar hydrofobowy lub substancja adhezyjna, 6-uszczelki z kauczuku silikonowego

Kłosze i elementy osłonowe izolatorów kompozytowych produkuje się z różnych materiałów (np. żywice cykloalifatyczne, elastomery itp.). Ze względu na właściwości użytkowe można je podzielić na sztywne i elastyczne. Wytrzyma-

łość elektryczna izolatorów kompozytowych uwarunkowana jest ich szczelnością i spójnością wszystkich elementów. W tym celu stosuje się odpowiednie materiały i środki pomocnicze i adhezyjne, wiążące, wypełniające i uszczelniające całość konstrukcji izolatora. Ich zadaniem jest zapobieganie wyladowaniom wzdłuż powierzchni granicznych oraz korozji włókien szklanych. W praktyce, jakość izolatorów kompozytowych zależy nie tylko od własności poszczególnych elementów, ale również od ich współdziałania podczas produkcji i eksploatacji. Dotychczasowe ograniczone zastosowanie izolatorów kompozytowych w warunkach napowietrznych wynika z podatności izolacji polimerowej na procesy starzeniowe pod wpływem warunków środowiskowych (np. ozon, tlenki azotu, promieniowanie ultrafioletowe, zmiany temperatury, wilgoć, zabrudzenia przemysłowe, pole elektryczne, naprężenia mechaniczne).

1.4. Konstrukcje izolatorów

Izolatory liniowe

Izolatory liniowe są przeznaczone do pracy w warunkach napowietrznych i są wykonywane w dwóch rodzajach, jako:

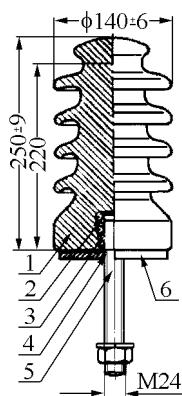
1. izolatory stojące,
2. izolatory wiszące.

Izolatory stojące znajdują zastosowanie w liniach średniego napięcia (do 30 kV), a także niekiedy w stacjach napowietrznych jako części izolacyjne odłączników oraz bezpieczników. W liniach wysokiego oraz najwyższego napięcia, stosuje się wyłącznie izolatory wiszące w postaci łańcuchów izolatorów kołpakowych lub izolatorów długopniowych. Izolatory stojące, stosowane obecnie do izolowania przewodów linii elektroenergetycznych, posiadają budowę pniową. Szkic tego typu izolatora podano na rys.3.4. Izolatory LSP odznaczają się dużą wytrzymałością elektryczną (są nieprzebijalne), brakiem wyladowań niezupełnych, poprawną pracą w warunkach zabrudzeniowych, są stosunkowo odporne na uderzenia mechaniczne, mogą być instalowane w dowolnym położeniu. Ze względu na te zalety, izolatory LSP wyparły stosowane powszechnie dawniej izolatory stojące, budowy deltowej LSD (rys. 3.5).

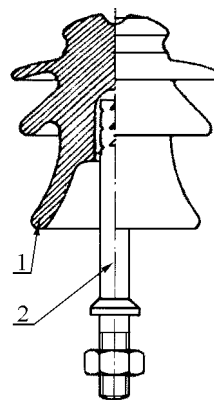
Izolatory LSD posiadają wiele wad, do których można zaliczyć przebijalność elektryczną, pękanie porcelany wskutek pęcznienia kitów lub nieostrożnego nakręcania części porcelanowej na trzonek. Ich klosze stosunkowo łatwo ulegają uszkodzeniu podczas transportu i montażu. Różne odmiany konstrukcyjne izolatorów typu LSD są wycofywane z eksploatacji i nie są już produkowane.



Pod względem mechanicznym izolatory stojące są narażone na działanie siły gnącej, przyłożonej do szyjki izolatora i skierowanej prostopadle do jego osi.

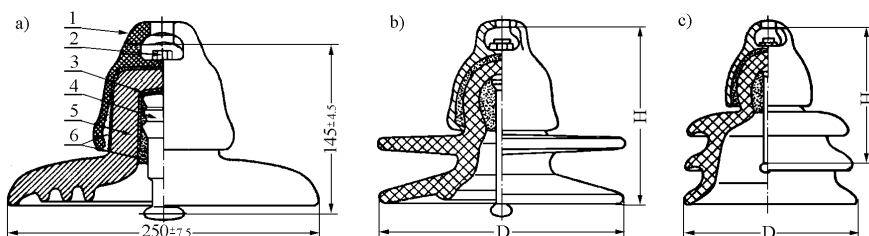


Rys.3.4. Izolator liniowy stojący LSP
1-porcelana, 2-podkładka, 3-kit siarkowy,
4-podkładka, 5-trzon prosty, 6-podkładka



Rys.3.5. Izolator liniowy stojący LSD
1-porcelana, 2-trzon prosty

Izolatory wiszące są budowane w różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych. Wśród wszystkich typów izolatorów wiszących można wyróżnić dwie zasadnicze grupy: izolatory o budowie kołpakowej oraz izolatory o budowie długopniowej. Izolatory kołpakowe są elementami łańcuchów izolatorów wiszących. Izolatory długopniowe mogą występować jako pojedyncze ogniwa (napięcie 110 kV) lub być elementami łańcuchów izolatorów. Liczba izolatorów kołpakowych lub długopniowych zastosowana w łańcuchu oraz ich budowa zależy od wielu czynników, a przede wszystkim od poziomu napięcia, sił mechanicznych i stopnia zanieczyszczenia atmosfery. Na rysunkach 3.6 i 3.7 podano najczęściej stosowane w liniach elektroenergetycznych izolatory kołpakowe i długopniowe.



Rys.3.6. Izolatory liniowe kołpakowe: a) izolator jednokołpakowy LK:

b) izolator jednokołpakowy przeciwzabrudzeniowy LKZ; c) izolator jednokołpakowy przeciwzabrudzeniowy NK3;

1-kołpak, 2-zawlecza, 3-podkładka, 4-trzonek, 5-porcelana, 6-cement 400

Łańcuchy izolatorów mogą być zawieszane na konstrukcjach wsporczych w różnym położeniu, od położenia pionowego (zawieszenie na słupach przelotowych) do położenia poziomego (zawieszenie na słupach krańcowych). W przypadku występowania sił mechanicznych przekraczających wytrzymałość pojedynczego łańcucha, stosowane są wielorzędowe łańcuchy izolatorów (np. dwu, trzorzędowe). Okucia (gniazda, trzonki) poszczególnych elementów w łańcuchu izolatorów mocowane są przegubowo, a przed rozłączeniem zabezpieczane są za pomocą zawleczek.

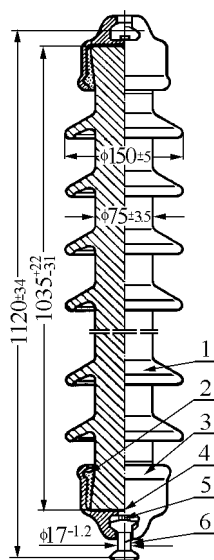
Zaletą izolatorów kołpakowych jest możliwość łatwego zestawienia łańcucha o dostatecznej wytrzymałości elektrycznej, jak również podwyższenie poziomu izolacji w linii przez doczepienie kolejnych ogniw. Stłuczenie jednego ogniwa w niewielkim stopniu wpływa na wytrzymałość elektryczną łańcucha izolatorów, poza tym po stłuczeniu klosza łańcuch zachowuje połączenie mechaniczne. Izolatory kołpakowe dzięki odpowiedniemu ukształtowaniu okuć i części ceramicznej odznaczają się dużą wytrzymałością mechaniczną na rozciąganie. Do wad izolatorów kołpakowych należy zaliczyć przebijalność elektryczną oraz znaczną nierównomierność rozkładu napięcia na poszczególnych ogniwach w przypadku długich łańcuchów. Ze względu na przebijalność – łańcuchy izolatorów kołpakowych wymagają wykonywania w eksploatacji pomiarów profilaktycznych, natomiast ze względu na nierównomierny rozkład napięcia wymagają stosowania armatur sterujących. Do pracy w warunkach zabrudzeniowych łańcuchy izolatorów kołpakowych mogą być komponowane z różnych typów izolatorów (np. LKZ, NK3).

Izolatory długopniowe pod względem wytrzymałości elektrycznej mają dużą przewagę nad izolatorami kołpakowymi, gdyż są nieprzebijalne. Odznaczają się także korzystniejszym rozkładem napięcia wzdłuż izolatora pojedynczego lub łańcucha izolatorów. Pod względem wytrzymałości mechanicznej są mniej pewne od izolatorów kołpakowych. W przypadku izolatorów długopniowych porcelana pracuje na rozciąganie (bardzo mała wytrzymałość), pęknięcie porcelany prowadzi do rozerwania łańcucha i opadnięcia przewodu na ziemię. Wyrób tego typu izolatorów wymaga bardzo dobrego opanowania technologii produkcji, zastosowania tworzywa ceramicznego o bardzo dobrych właściwościach mechanicznych oraz dokładnej kontroli jakości wykonania każdej sztuki izolatora.

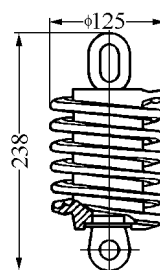
Izolatory długopniowe pracują zadowalająco w różnych warunkach atmosferycznych i w środowiskach o różnym stopniu zapylenia atmosfery. Izolatory długopniowe przeznaczone do pracy w okręgach przemysłowych posiadają w



stosunku do izolatorów pracujących w zwykłych warunkach większą liczbę kłoszy klasycznej konstrukcji lub mają kłosze specjalnie ukształtowane, o stosunkowo dłużej drodze upływu (np. izolatory spiralne rys.3.8).



Rys.3.7. Izolator liniowy wiszący długopniowy LP
1-porcelana, 2-kit siarkowy, 3-kolpak, 4-podkładka, 5-zawlecza, 6-lącznik



Rys.3.8. Izolator wiszący o kłoszach spiralnych na napięcie 15 kV

Izolatory o kłoszach spiralnych, produkowane i rozpowszechnione we Francji, w stosunku do izolatorów o zwykłych kłoszach odznaczają się wyższą wytrzymałością pod deszczem i dla napięć udarowych oraz posiadają dużą wytrzymałość w warunkach zabrudzeniowych. Izolatory długopniowe zwykłe, produkcji polskiej, o napięciu znamionowym 110 kV posiadają 12 kłoszy, natomiast taki sam izolator przeciwbudzeniowy ma 14 lub 17 kłoszy. Na świecie produkowane są izolatory długopniowe o 21, 22 lub nawet o 27 kłoszach, przy znormalizowanej długości 1270 mm. Znormalizowana średnica pnia porcelanowego izolatorów długopniowych wynosi 75 oraz 85 mm. Krajowe izolatory długopniowe są oznaczane literami LP, a podane po tych literach liczby określają średnicę oraz liczbę kłoszy (np. LP 75/12, LP 85/14).

W układach elektroenergetycznych na izolatory liniowe działają siły mechaniczne, pochodzące między innymi od naciągu przewodu, ciężaru sadzi, parcia

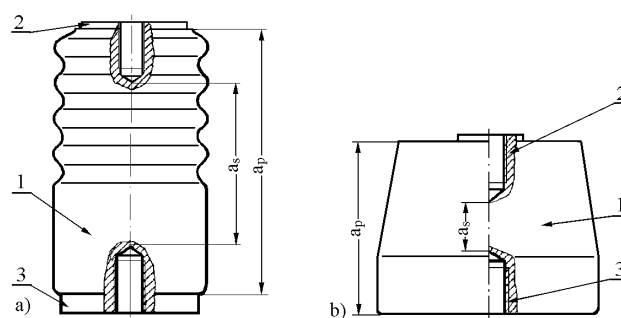
wiatru, ciężaru przewodu. Wytrzymałość mechaniczna izolatorów wiszących w znacznym stopniu zależy od czasu działania siły. Dlatego dla tych izolatorów jest określana wytrzymałość krótkotrwała 1-minutowa, 1-godzinna, 24-godzinna, 1-letnia oraz długotrwała. Dla izolatorów kołpakowych, ze względu na przebijalność określa się ponadto wytrzymałość elektromechaniczną. Wytrzymałość mechaniczna krótkotrwała wynosi od kilku do kilkunastu kN, natomiast wytrzymałość 1-letnia i długotrwała jest mniejsza nawet o 50 %. Również wytrzymałość elektromechaniczna jest niższa o około 25 % od wytrzymałości krótkotrwałej.

Izolatory stacyjne wsporcze

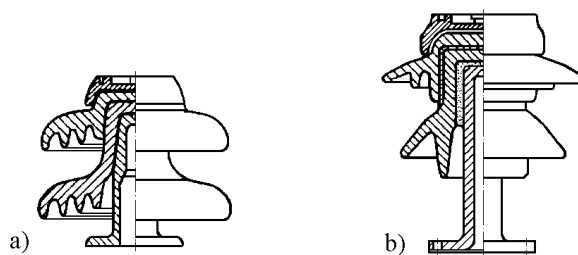
W stacjach elektroenergetycznych izolatory wsporcze wykorzystywane są przede wszystkim do mocowania przewodów sztywnych w postaci szyn (np. płaskowniki, pręty, kształtowniki itp.). Również są powszechnie stosowane w budowie aparatów elektrycznych (np. odłączniki, wyłączniki, podstawy bezpieczników itp.). W zależności od budowy stacji elektroenergetycznej, izolatory wsporcze pracują w warunkach wewnętrznych bądź w warunkach napowietrznych. Do mechanicznego mocowania szyn, względnie części aparatów elektrycznych, izolatory wsporcze są wyposażone w odpowiednia ukształtowane okucia. Stopy izolatorów wsporczych mają kształt okrągły, owalny bądź prostokątny.

Izolatory wsporcze wewnętrzne (rys. 3.9) – w odróżnieniu od izolatorów napowietrznych – mają stosunkowo prostą konstrukcję. Powierzchnia zewnętrzna korpusów porcelanowych jest gładka lub posiada tylko małe, nieliczne żeberka. Natomiast izolatory wsporcze napowietrzne, aby mogły stanowić dostateczną izolację w różnych warunkach atmosferycznych i przy różnym stopniu zanieczyszczenia powietrza, są zaopatrzone w klosze o silnie pofałdowanej powierzchni. Wśród izolatorów napowietrznych można wyróżnić kilka różnych rozwiązań konstrukcyjnych, a głównie izolatory wsporcze trzonowe (rys. 3.10) oraz izolatory wsporcze długopniowe (rys. 3.11).



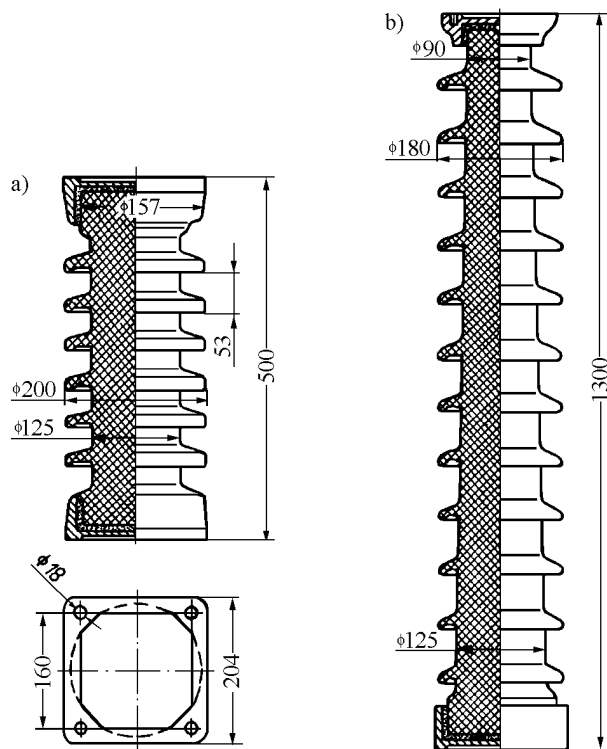


Rys. 3.9. Izolatory wsporcze wewnętrzne: a) izolator SW (nieprzebijalny $a_s > 0.5 a_p$), b) izolator SW (przebijalny $a_s < 0.5 a_p$); 1 – część ceramiczna, 2 – kołpak, 3 – stopa

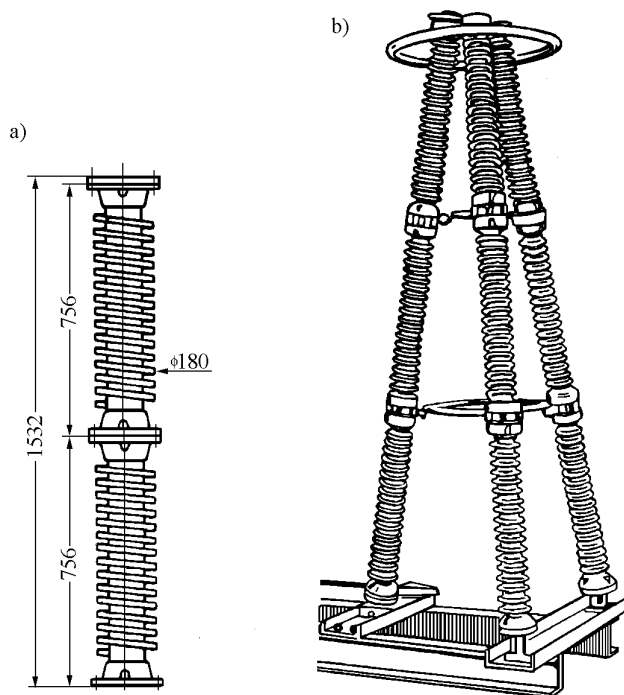


Rys. 3.10. Izolatory wsporcze napowietrzne konstrukcji trzonowej: a) izolator trzonowy przeciwwzabrudzeniowy, b) izolator trzonowy produkcji rosyjskiej ISZD-35

Pod względem wytrzymałości elektrycznej zarówno izolatory wsporcze wewnętrzne jak i napowietrzne mogą być przebijalne (konstrukcje wnekowe), lub nieprzebijalne (konstrukcje pełnopniowe). Gabarytowo izolatory wsporcze wykonywane są w jednym elemencie na napięcia do 110 kV. Na napięcia wyższe, izolatory wsporcze są budowane w postaci kolumn złożonych z kilku elementów. Liczba ogniów izolatorowych w kolumnie oraz liczba kolumn w konstrukcji jest zależna od poziomu napięcia i sił mechanicznych działających na konstrukcję (rys. 3.12). Dla poprawienia rozkładu napięcia wzdłuż kolumny izolatorów wsporczych stosowane są pierścienie sterujące, podobnie jak w izolatorach liniowych.



Rys. 3.11. Izolatory wsporcze napowietrzne konstrukcji pniowej: a) na 35 kV, b) na 110 kV



Rys. 3.12. Izolatory wsporcze napowietrzne:
 a) jednokolumnowy (napięcie 170 kV)
 b) trójkolumnowy (napięcie 300 – 500 kV)

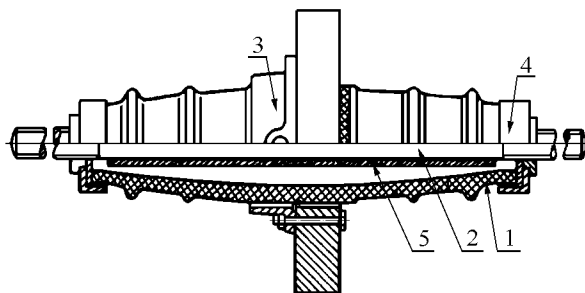
Na izolatory wsporcze działają w eksploatacji siły mechaniczne o charakterze statycznym (siły elektrodynamiczne występują podczas zwarc). Obciążenie dynamiczne działa najczęściej w płaszczyźnie prostopadłej do osi izolatora i jest przyłożone do górnego okucia powodując zginanie. Siły elektrodynamiczne, wobec nieznacznego udziału sił statycznych, są decydującym elementem doboru wytrzymałości mechanicznej izolatorów wsporczych.

Izolatory przepustowe

Izolatory przepustowe są przeznaczone do przeprowadzania przewodów wysokiego napięcia przez ściany budynków, komór, pokrywy i obudowy transformatorów, wyłączników itp. Tak więc różne rodzaje tych izolatorów należą do grupy izolatorów stacyjnych oraz izolatorów aparaturowych. Izolatory przepustowe różnią się znacznie budową w zależności od wartości napięcia, do którego są stosowane.

Konstrukcja tradycyjnych izolatorów na napięcia średnie jest prosta. Izolator taki składa się z korpusu porcelanowego, wykonanego w kształcie walca, zaopatrzonego w części środkowej w kołnierz służący do jego mocowania np. w ścianie. Przez środek cylindra przechodzi szyna wiodąca prąd, mocowana do korpusu za pomocą okuć. Na ogół, przy napięciach powyżej 20 kV bezpośrednio na szynę nasadzona jest rura z papieru bakelizowanego w celu ograniczenia wy-

ładowań niezupełnych, która również zwiększa wytrzymałość izolatora na przebicie (rys. 3.13).



Rys. 3.13. Izolator przepustowy z wnęką powietrzną
1 - porcelana, 2 – wysokonapięciowa szyna prądowa, 3 –
kołnierz, 4 – kołpak, 5 – rura z papieru bakelizowanego

Konstrukcje izolatorów przepustowych wewnętrznych oraz napowietrznych na napięcia średnie niewiele różnią się między sobą. Korpusy izolatorów napowietrznych są bardziej rozbudowane i posiadają klosze. Okucia i kołnierz izolatora są wykonywane przeważnie z żeliwa. W izolatorach przeznaczonych do pracy przy dużych prądach roboczych okucia i kołnierze są robione z materiałów niemagnetycznych w celu ograniczenia efektów cieplnych. Kołnierze izolatorów przepustowych mają konstrukcję umożliwiającą ich mocowanie w pozycji poziomej, pionowej oraz skośnej.

Izolatory przepustowe na wysokie napięcia odznaczają się skomplikowaną budową, są złożone przeważnie z kilku materiałów izolacyjnych. Korpus porcelanowy spełnia rolę osłony izolacyjnej, natomiast zasadniczą część izolatora stanowi tzw. część miękka, na ogół izolacja papierowo-olejowa (rys. 3.14). Takie rozwiązanie konstrukcyjne umożliwia opanowanie mechanizmu przebiecia cieplnego, między innymi przez zastosowanie wewnątrz izolatora materiału izolacyjnego o małym współczynniku strat dielektrycznych. Wspólnym problemem dla wszystkich izolatorów przepustowych są wyładowania ślizgowe. Wpływ wyładowań po powierzchni na wytrzymałość elektryczną izolatora przepustowego jest tak duży, że muszą być stosowane środki przeciwdziałające ich rozwojowi. Wzrost wartości napięcia początkowego wyładowań ślizgowych $U_{o\dot{s}l}$ można osiągnąć różnymi sposobami, a mianowicie poprzez (rys. 3.15): ograniczenie pojemności C przez zmianę wymiarów geometrycznych układu izolacyjnego, stosowanie sterowania oporowego (powierzchni półprzewodzących), ograniczającą składową styczną natężenia pola w kierunku rozwoju

wyładowania, oraz barier na jego drodze w postaci kłoszy, kołnierzy, żeber itp., stosowanie ekranów sterujących pole w przepustowych układach izolacyjnych.

Sterowanie rozkładu pola elektrycznego za pomocą ekranów jest typowym rozwiązaniem w izolatorach przepustowych, które ze względu na pojemnościowy charakter układu nazywane są przepustami kondensatorowymi. Jest ono stosowane głównie w izolatorach na wysokie i najwyższe napięcia. Pojemnościowe sterowanie rozkładu napięcia i naprężeń elektrycznych osiąga się przez wprowadzenie do rdzenia izolacyjnego cylindrów przewodzących o ściśle określonej średnicy i długości (rys. 3.16).

Przy n elektrodach otrzymuje się $n + 1$ szeregowo połączonych kondensatorów, których pojemności są proporcjonalne do wyrażenia $\frac{r_i \cdot l_i}{a_i}$, gdyż

$$C_i = \frac{2\pi\epsilon r_i \cdot l_i}{a_i}. \text{ Długości } l_i \text{ są stopniowane równomiernie } (\Delta l = \text{const.}), \text{ grubość}$$

warstw a_i dobiera się tak do promienia r_i , aby był spełniony warunek $C_i = \text{const.}$ Dla takiej konstrukcji napięcia między poszczególnymi warstwami są sobie równe. Na przykład, przy trzech elektrodach pomocniczych, jak zaznaczono na rysunku 3.16, potencjały tych elektrod będą wynosiły odpowiednio 25, 50 i 75 % napięcia U . Istotą takiego konstruowania jest uzyskanie izolatora przepustowego o w miarę równomiernym rozkładzie naprężeń w całej objętości i jak największej wytrzymałości elektrycznej. Opanowanie naprężeń promieniowych nie nastręcza większych trudności. Inaczej wygląda sprawa naprężeń w kierunku stycznym do powierzchni dielektryku. Gdyby zastosować zwykłą rurę bakelitową, bez elektrod sterujących, rozkład naprężeń elektrycznych na powierzchni izolatora byłby bardzo nierównomierny i niemożliwe byłoby utrzymanie tych naprężeń w dopuszczalnych granicach. W celu porównania, podano na rysunku 3.17 szkic rozkładu powierzchni ekwipotencjalnych wewnątrz rury bakelitowej (bez elektrod) i wewnątrz przepustu kondensatorowego. W przypadku rury występuje zagęszczenie powierzchni ekwipotencjalnych w pobliżu kołnierza. W przypadku przepustu - tego zagęszczenia nie ma.

Elektrody sterujące w przepuście powodują, iż powierzchnie ekwipotencjalne przecinają powierzchnię zewnętrzną izolatora w punktach B, C, itd. (rys. 3.17b). Jeśli $\Delta l_1 = \Delta l_2 = \dots$, to $AB = BC = \dots$, to $U_y = f(y)$ jest funkcją rosnącą liniowo. Naprężenia styczne, zgodnie z wzorem :

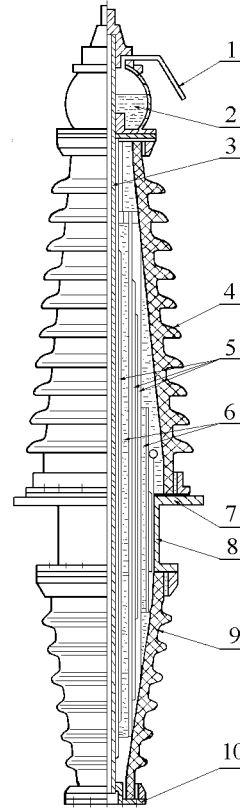
$$E_y = \frac{V_2 - V_1}{\Delta y} = \frac{V_B - V_A}{\Delta l} = \frac{\Delta U}{\Delta l}, \text{ mają na całej długości izolatora w przybli-}$$

żeniu wartość stałą, co jest właśnie celem stosowania elektrod sterujących.



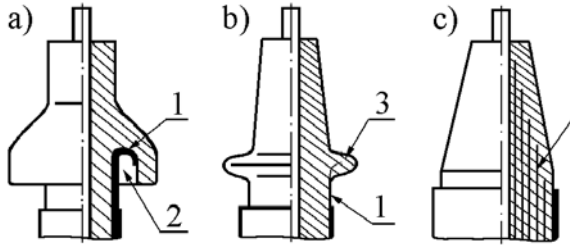
Problemy dotyczące izolatora przepustowego nie kończą się na najważniejszym, przedstawionym powyżej, zagadnieniu zapewnienia równomiernego rozkładu naprężeń poosiowych. Istotnym problemem są nieuniknione przy konstrukcji kondensatorowej izolatora efekty krawędziowe na końcach elektrod sterujących. Nawet bardzo cienka przewodząca folia stanowi „ciało obce” wewnątrz dielektrycznych warstw papieru. Powstają wskutek tego na krawędziach folii puste miejsca, wprawdzie o mikroskopowych wymiarach, lecz w tych „mikrokawernach” występują duże naprężenia elektryczne, prowadzące do występowania wyładowań niezupełnych.

Innym zagadnieniem, wspólnym dla wszystkich konstrukcji z papieru bakelizowanego, jest przegrzewanie się części izolacyjnej wskutek występowania w niej strat dielektrycznych. Papier jest złym przewodnikiem ciepła, zatem straty dielektryczne mogą przy dużych grubościach dielektryku spowodować znaczny wzrost temperatury w jego wnętrzu w porównaniu z temperaturą na powierzchni. Zjawisko to jest samowzbudne, gdyż wzrost temperatury powoduje coraz większy wzrost strat dielektrycznych. Może to doprowadzić do zachwiania równowagi cieplnej izolatora przepustowego i do jego przebicia cieplnego. Izolatory przepustowe muszą być zatem poddawane próbie stabilizacji cieplnej przy największym dopuszczalnym napięciu roboczym. Próba polega na pomiarze współczynnika stratności w czasie (kilkanaście godzin). Wartość $\tan \delta$ dla dobrego izolatora powinna się ustalić asymptotycznie na dopuszczalnym poziomie (np. dla izolatora



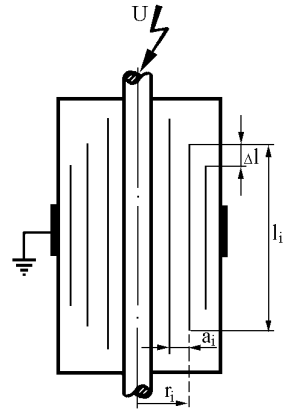
Rys. 3.14. Izolator przepustowy olejowy z przegrodami sterującymi na napięcie 110 kV
 1 – rurka otworu wydechowego, 2 – konserwator, 3 – szyna wysokonapięciowa w postaci rury, 4 – osłona górna, 5 – przegrody izolacyjne w postaci cylindrów zaopatrzone w ekrany sterujące, 6 – kanały olejowe, 7 – kołnierz, 8 – cylinder kołnierza, 9 – osłona dolna, 10 – denko

123 kV $\text{tg}\delta$ wynosi 0.03). Przy najwyższych napięciach nie stosuje się już papieru bakelizowanego lecz skomplikowany układ przegród i barier z papieru izolacyjnego oraz elektrod sterujących. Całość jest pogrążona w kąpieli olejowej (rys. 3.14).

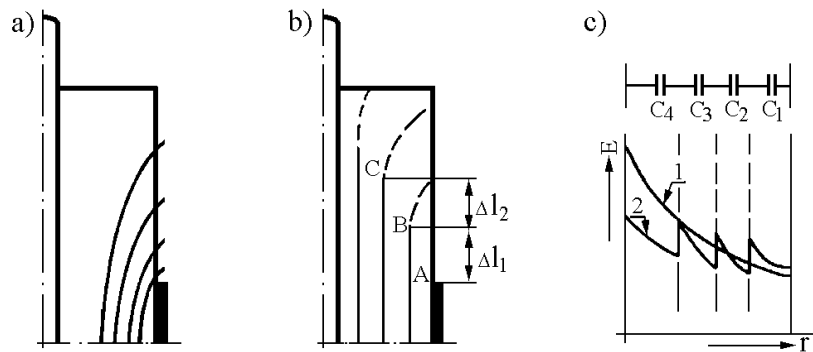


Rys. 3.15. Przykłady konstrukcji izolatorów przepustowych zapobiegające powstawaniu wyładowań ślizgowych

a) powierzchnia przewodząca (1) z kieszenią (2), b) bariera w postaci kołnierza (3), c) przepust kondensatorowy z ekranami (4)



Rys. 3.16. Schematyczny obraz izolatora przepustowego kondensatorowego



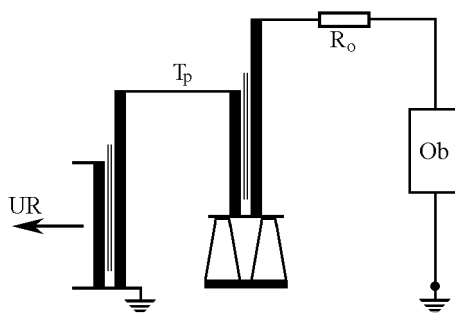
Rys. 3.17. Szkic rozkładu powierzchni ekwipotencjalnych: a) wewnątrz rury bakelitowej, b) wewnątrz przepustu kondensatorowego oraz c) rozkład napięć pola elektrycznego w kierunku promieniowym: 1- bez sterowania, 2 – ze sterowaniem pojemnościowym

2. POMIARY

Uwaga: Pomiary i opis izolatorów należy wykonać zgodnie z normami. Zestaw norm jest do dyspozycji grupy w trakcie odrabiania ćwiczenia.

2.1. Pomiar napięcia przeskoku na sucho

Schemat połączeń układu probierczego



Rys. 3.18. Schemat układu do prób napięciem przemiennym. UR – układ regulacji napięcia, T_p - zespół transformatorów probierczych ($2 \times 50000/220\text{ V}$), R_o - rezystor tłumiący, Ob - obiekt badany (izolator)

Sposób wykonania pomiaru

Dla wskazanego, przez prowadzącego ćwiczenie, izolatora wykonać pomiar wartości napięcia przeskoku na sucho przy napięciu przemiennym, według norm. Wszystkie czynności związane z przygotowaniem i wykonaniem pomiaru oraz wyniki pomiaru zanotować w protokole.

Sposób opracowania wyników pomiaru

W sprawozdaniu należy podać wartość napięcia przeskoku dla badanego izolatora, obliczoną na podstawie wyników pomiaru z uwzględnieniem wymaganych przez normę poprawek.

2.2. Próba napięciowa

Schemat połączeń

Układ probierczy jest taki sam, jak w p. 2.1 (rys. 3.18).

Sposób wykonania pomiaru

Dla badanego w poprzednim punkcie izolatora, przeprowadzić próbę napięciową przy napięciu przemiennym zgodnie z wymaganiami norm. Warunki wykonania próby zanotować w protokole.

Opracowanie wyników pomiaru

W sprawozdaniu, na podstawie przeprowadzonego pomiaru, podać ocenę stanu badanego izolatora.

2.3. Pomiar długości dróg przeskoku

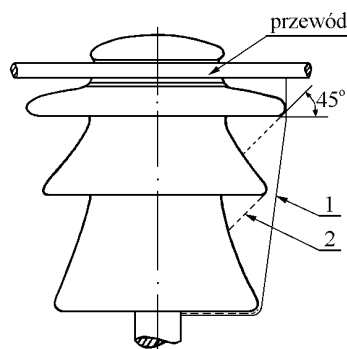
Uwagi ogólne

Wytrzymałość elektryczna izolatorów jest zdeterminowana przede wszystkim przez rozkład pola elektrycznego. W praktycznych układach izolacyjnych w instalacjach elektroenergetycznych rozkład pola elektrycznego nie jest równomierny, ani globalnie (biorąc pod uwagę cały odstęp izolacyjny), ani lokalnie (uwzględniając ukształtowanie powierzchni izolatora). Dokładne wyznaczenie naprężeń elektrycznych i obliczenie optymalnej konstrukcji izolatora jest zatem bardzo trudne i wymaga stosowania technik komputerowych. W praktyce inżynierskiej, dla obliczenia wymiarów izolatorów liniowych i stacyjnych korzysta się z bardzo prostych wzorów empirycznych, bowiem ze względu na rozkład pola elektrycznego układy izolacyjne typu wsporcze (izolacja fazowa) można traktować jako układ ostrze – płyta, a międzyfazowe odstępy izolacyjne – jako układ ostrze – ostrze. Wytrzymałość elektryczna izolatora dla napięć przemiennych i udarowych zależy od wymiaru głównego, tj. od najmniejszego odstępu między skrajnymi okuciami. Miarą tej wytrzymałości jest tzw. **droga przeskoku na sucho (a_s)**. W warunkach napowietrznych izolatory muszą być wyposażone w klosze, które umożliwiają utrzymanie wymaganej wytrzymałości elektrycznej pod deszczem i w warunkach zabrudzeniowych. W obliczeniach, dla określenia tej wytrzymałości posługujemy się pojęciem: **droga przeskoku pod deszczem (a_d)** i **droga upływu (a_u)**. Jako drogę przeskoku na sucho przyjmuje się najkrót-

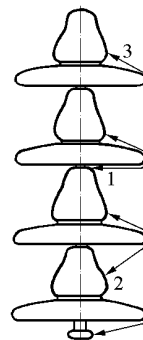


szy odcinek pomiędzy elektrodami izolatora, zmierzony po napiętej nitce. Dla izolatora zraszane deszczem drogę przeskoku na mokro stanowi suma odcinków suchych, na których może utworzyć się kanał przewodzący. Dla prób laboratoryjnych i obliczeń przyjmuje się, że izolator jest zraszany równomiernie deszczem padającym pod kątem 45° w stosunku do pionu (inne parametry wody sztucznego deszczu to: intensywność opadu $3 \text{ mm/min} \pm 10 \%$, rezystancja właściwa wody $10000 \Omega\text{cm} \pm 10 \%$, temperatura wody nie powinna różnić się więcej niż $\pm 15^\circ\text{C}$ od temperatury otoczenia).

Na rysunkach 3.19, 3.20 i 3.21 są podane szkice różnych izolatorów z zaznaczonym sposobem pomiaru dróg przeskoku.



Rys. 3.19. Izolator liniowy stojący
1 – droga przeskoku na sucho as, 2 – droga przeskoku pod deszczem ad



Rys. 3.20. Łańcuch izolatorów jednokółpakowych

1 – droga przeskoku na sucho ogniwa izolatora, 2 – droga przeskoku na sucho ogniwa izolatora znajdującego się w łańcuchu, 3 – droga przeskoku całego łańcucha izolatorów

Jedną z wielu empirycznych zależności spotykanych w literaturze, według której można obliczyć napięcie przeskoku na sucho izolatora wsporcze lub długopniowego jest opracowany w Instytucie Elektrotechniki wzór:

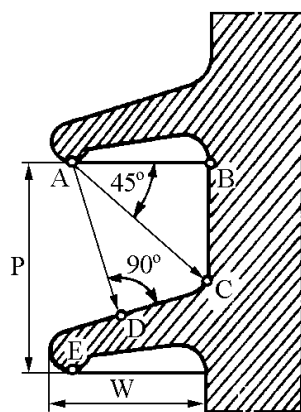
$$U_p = 20 + 3.35a$$

gdzie: U_p – napięcie przeskoku [kV], a – droga przeskoku na sucho [cm].

Zależność powyższa jest słuszna w zakresie $10 < a < 200 \text{ cm}$.

Wartość napięcia przeskoku pod deszczem można wyznaczyć według wzoru Kuhla:

$$U_{pd} = 14 + 1.6 \sum a_m + 2.6 \sum a_s$$



Rys. 3.21. Sposób określenia długości dróg suchych i mokrych wzdłuż drogi przeskoku po powierzchni izolatora długopniowego
 $a_s = AC$ lub AD , $a_m = CE$ lub DE

gdzie: U_{pd} – napięcie przeskoku pod deszczem, Σa_m – suma odcinków mokrych [cm], Σa_s – suma odcinków suchych [cm].

Zależność powyższa jest słuszna dla napięć znamionowych do 220 kV.

Udarowe napięcie przeskoku 50-procentowe można oszacować dla izolatorów według zależności podanej przez Boninga:

dla udaru dodatniego -

$$U_{50\%} = 19 + 5.1a$$

dla udaru ujemnego -

$$U_{50\%} = 25 + 6.95a$$

gdzie: $U_{50\%}$ - 50-procentowe napięcie przeskoku [kV], a – droga przeskoku na sucho [cm].

Zależność jest słuszna dla udaru normalnego (1.2 μ s) oraz dla $20 < a < 200$ cm.

Sposób wykonania pomiaru

Dla wskazanego przez prowadzącego ćwiczenie łańcucha izolatorów jedno-kołpakowych oraz izolatora długopniowego pomierzyć drogi przeskoku na sucho i pod deszczem. Wyniki pomiaru zanotować w protokóle.

Opracowanie wyników pomiaru

Na podstawie wykonanych pomiarów dróg przeskoku obliczyć napięcia przeskoku:

na sucho (50 Hz),

pod deszczem (50 Hz),

udarowe dla biegunowości dodatniej i ujemnej.

2.4. Dobór izolatorów do warunków środowiskowych

Dla zadanych przez prowadzącego ćwiczenie warunków (napięcie znamionowe linii oraz strefa zabrudzeniowa) posługując się normami zaprojektować izolację doziemną linii (zawieszenie izolatorów – przelotowe)

Sposób wykonania zadania

należy obliczyć wartość napięcia przewodów linii w stosunku do ziemi, ustalić wg norm zabrudzeniowych długość drogi upływu (jednostkowa droga, całkowita droga),

korzystając z norm przedmiotowych dla izolatorów liniowych zaprojektować izolację w dwóch wersjach (łańcuchy izolatorów kołpakowych, izolatory długopniowe).

UWAGA: W drugiej wersji można zaprojektować izolację na podstawie charakterystyk zabrudzeniowych

Opracowanie wyników projektowania

W sprawozdaniu należy zamieścić stosowne obliczenia oraz podać zwięzły opis przeprowadzonej procedury doboru izolatorów do zadanych warunków i krótką charakterystykę proponowanego rozwiązania.

3. UWAGI I WNIOSKI

ĆWICZENIE 4

WYTRZYMAŁOŚĆ UDAROWA UKŁADÓW ELEKTRYCZNYCH W POWIETRZU I PODSTAWY KOORDYNACJI IZOLACJI

1. WIADOMOŚCI OGÓLNE

1.1. Charakterystyka udarowa

Definicja.

Charakterystyka udarowa jest to krzywa określająca zależność udarowego napięcia przeskoku od czasu do przeskoku.

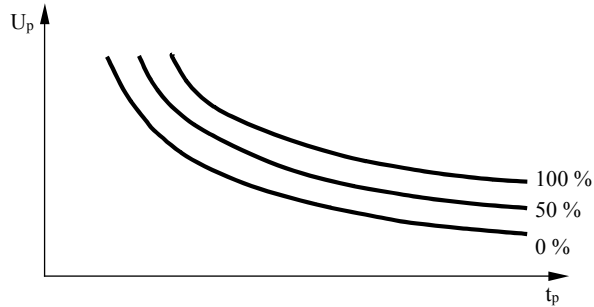
Ta zwięzła i z pozoru jednoznaczna definicja, wymaga jednakże pewnych komentarzy. Pod pojęciem „udarowe napięcie przeskoku” rozumie się najwyższą chwilową wartość napięcia, jaka pojawiła się na elektrodach układu licząc od początku doprowadzonego udaru, do chwili przeskoku. Jest to umowa nie posiadająca pełnego uzasadnienia fizycznego, lecz powszechnie przyjęta. Jeżeli zatem przeskok nastąpi na czole udaru, udarowe napięcie przeskoku będzie równoznaczne z chwilową wartością napięcia w momencie przeskoku, natomiast w przypadku przeskoku na grzbiecie udaru, udarowym napięciem przeskoku będzie wartość szczytowa udaru. Podana umowa ułatwia eksperymentalne wyznaczenie charakterystyki udarowej, gdyż umożliwia stosowanie mierników wartości szczytowej mierzących zawsze największą chwilową wartość napięcia udarowego, np. woltomierzy cyfrowych lub iskierników kulowych.

Czas do przeskoku t_p , łatwy do odczytania na podstawie zdjęcia lub bezpośrednio za pomocą miernika elektronicznego, też nie jest z punktu widzenia powyższej definicji pojęciem jednoznacznym. Przeskok jest typowym zjawiskiem stochastycznym, nawet, jeżeli do badanego układu elektrod doprowadzi się serię jednakowych, pod względem kształtu i wartości szczytowej udarów, to



czasy do przeskoku będą miały za każdym razem inną wartość podlegając rozrzutowi statystycznemu. Stwierdzono eksperymentalnie, że w granicach ($t_{p\text{sr}} - 2\sigma$, $t_{p\text{sr}} + 2\sigma$) rozkład czasów do przeskoku podlega tzw. rozkładowi normalnemu lub inaczej rozkładowi Gaussa ($t_{p\text{sr}}$ – średnia arytmetyczna czasów do przeskoku, σ – odchylenie standardowe). W przedziale ($t_{p\text{sr}} - 2\sigma$, $t_{p\text{sr}} + 2\sigma$) mieści się około 95,4% wszystkich możliwych czasów do przeskoku; można, zatem przyjąć, że czasy: $t_{p\text{min}} = t_{p\text{sr}} - 2\sigma$ oraz $t_{p\text{max}} = t_{p\text{sr}} + 2\sigma$ określają praktyczne granice rozrzutów t_p . Dla danej wartości

szczytowej uderu używamy zatem trzy charakterystyczne punkty o odciętych: $t_{p\text{min}}$, $t_{p\text{sr}}$, $t_{p\text{max}}$. Dokonując pomiarów t_p przy innych wartościach szczytowych obliczamy dla każdej z nich te same charakterystyczne czasy i odpowia-

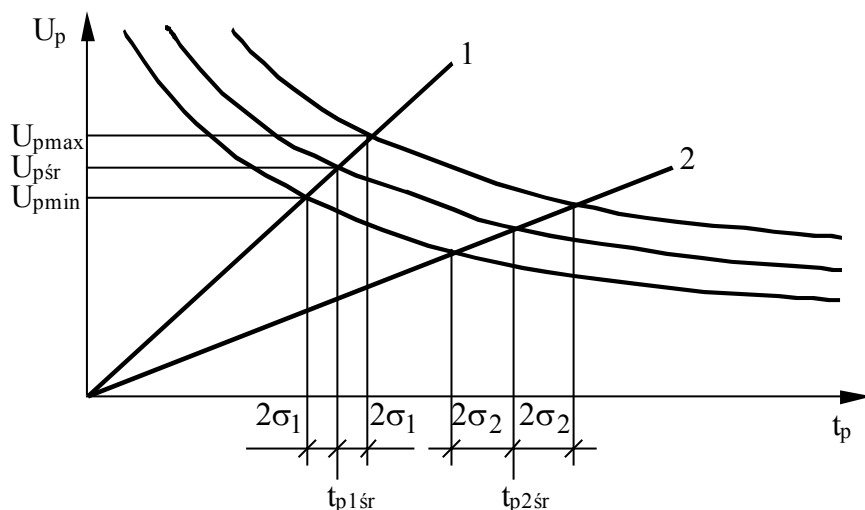


Rys. 4.1. Charakterystyki uderowe 100%, 50% i 0%

dające im punkty nanosimy na układ współrzędnych $U_p = f(t_p)$. Łącząc za pomocą oddzielnych krzywych wszystkie punkty o odciętych odpowiednio ($t_{p\text{min}}$, $t_{p\text{sr}}$, $t_{p\text{max}}$) otrzymuje się pasmo charakterystyk uderowych ograniczone od góry 100-procentową charakterystyką uderową, od dołu 0-procentową charakterystyką uderową. Środkowa krzywa nosi nazwę 50-procentowej charakterystyki uderowej i nazywana jest po prostu charakterystyką uderową (rys. 4.1.).

Przedstawiona zasada wyznaczania czasów $t_{p\text{min}}$, $t_{p\text{sr}}$ i $t_{p\text{max}}$ obowiązuje w przypadku, gdy przeskok występuje na grzbiecie uderu, czyli - zgodnie z powyższą cytowaną umową - $U_p = \text{const}$. Gdy przeskoki występują na czole uderu, $U_p \neq \text{const}$ i trzeba postępować inaczej. Korzysta się tutaj przy wyznaczaniu charakterystycznych czasów z faktu, że wartości napięć przeskoku rozłożone są wzdłuż czoła uderu - zatem po obliczeniu $t_{p\text{sr}}$ odkłada się odcinki ($t_{p\text{sr}} - 2\sigma$) oraz ($t_{p\text{sr}} + 2\sigma$) na osi odciętych a proste prostopadłe do tych osi przechodzące przez wartości $t_{p\text{min}}$, $t_{p\text{sr}}$ i $t_{p\text{max}}$ przecinają czoło uderu w punkcie o rzędnych odpowiednio $U_{p\text{min}}$, $U_{p\text{sr}}$, $U_{p\text{max}}$ (rys. 4.2.).

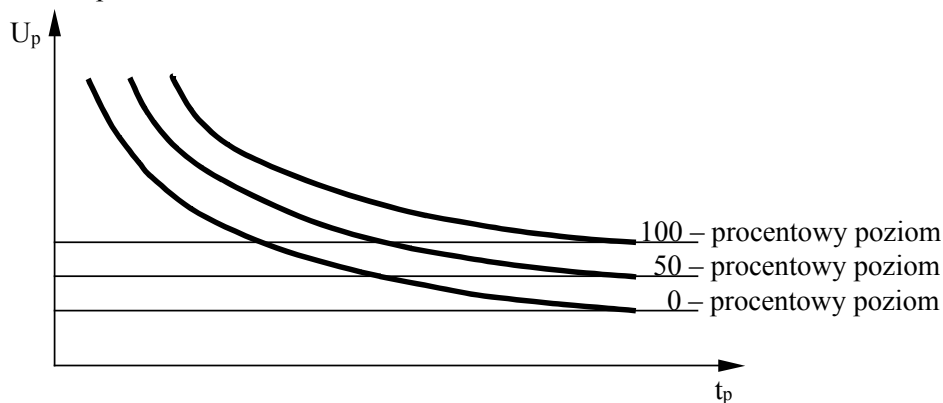
Łatwo zauważyć, że charakterystyki uderowe kształtem przypominają hiperbole, ale w swych najniższych punktach są styczne do pewnych prostych, które nazywają się poziomami charakterystyk (rys. 4.3.). Poziome charakterystyki uderowych spełniają, podobnie jak same charakterystyki, znaczną rolę w



Rys. 4.2. Sposób wyznaczania punktów charakterystyk udarowych w przypadku przeskoków występujących na czole udarów. 1, 2 – czola udarów o różnych wartościach szczytowych

koordynacji izolacji. Nie wyznacza się ich oczywiście jako stycznych do wcześniej już wykreślonych charakterystyk udarowych: wręcz przeciwnie - to właśnie ich znajomość pozwala określić przebieg charakterystyk w ich najniższej części.

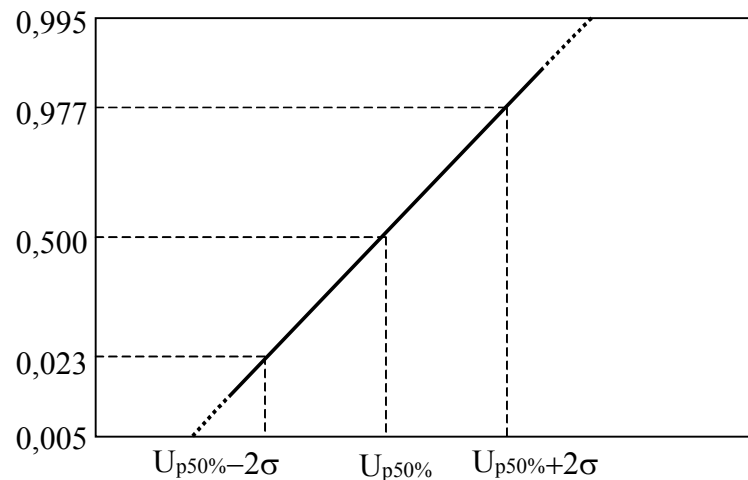
W celu określenia poziomów charakterystyk udarowych wyznacza się dla danego układu elektrod zależność $p = f(U_p)$, gdzie p jest tzw. prawdopodobieństwem przeskoku



Rys. 4.3. Charakterystyki udarowe i poziomy charakterystyk

$$p = \frac{n}{N}$$

gdzie: N - liczba uderów doprowadzonych do układu elektrod,
 n - liczba uderów, które wywołały przeskok.



Rys. 4.4. Wyznaczanie poziomów charakterystyk uderowych

Opracowanie statystyczne wyników pomiarów polega, podobnie jak w przypadku czasów do przeskoku, na znalezieniu trzech charakterystycznych napięć przeskoku: U_{pmin} , $U_{p\bar{s}r}$, U_{pmax} . Można to zrobić bądź bezpośrednio za pomocą obliczeń ($U_{pmin} = U_{p\bar{s}r} - 2\sigma$, $U_{pmax} = U_{p\bar{s}r} + 2\sigma$), bądź też zdejmując tzw. krzywą prawdopodobieństwa przeskoku, która w granicach ($U_{p\bar{s}r} - 2\sigma$, $U_{p\bar{s}r} + 2\sigma$), daje się opisać za pomocą krzywej Gaussa. Krzywa ta, narysowana w skali liniowej ma charakter rozciągniętej i pochylonej w prawo litery S. Jeżeli nanieść ją na układ współrzędnych, na osi rzędnych którego znajduje się skala rozkładu normalnego (siatka funkcyjna rozkładu Gaussa), krzywa ta stanie się prostą, łatwą do narysowania, np. przy zastosowaniu metody najmniejszych kwadratów (patrz rys. 4.4.). Wartości $U_{p\bar{s}r} - 2\sigma$ odpowiada $p \approx 2,3\%$, wartości $U_{p\bar{s}r} + 2\sigma$ odpowiada $p \approx 97,7\%$, łatwo, zatem znaleźć te wartości napięć. W technice wysokich napięć U_{pmin} , $U_{p\bar{s}r}$ i U_{pmax} są nazywane odpowiednio:

U_{pmin} - minimalnym 0% uderowym napięciem przeskoku,

$U_{p\bar{s}r}$ - minimalnym 50% uderowym napięciem przeskoku,

U_{pmax} - minimalnym 100% uderowym napięciem przeskoku.

Mając narysowaną charakterystykę $p = f(U_p)$ można wyznaczyć także odchylenie standardowe σ . Jest ono różnicą między wartością U_p dla

prawdopodobieństwa $p = 50\%$ ($U_{p50\%}$) a wartością U_p dla prawdopodobieństwa, $p = 16\%$ ($U_{p16\%}$).

$$\sigma = U_{p50\%} - U_{p16\%}$$

Jeżeli przyjąć, że prawdopodobieństwo przeskoku 2,3% odpowiada praktycznie najmniejszemu napięciu, które jest jeszcze w stanie wywołać przeskok, to w polu charakterystyk udarowych napięcie to odpowiada najniższemu punktowi charakterystyki 0-procentowej, prosta $U_p = U_{pmin}$ jest, zatem w tym punkcie styczna do charakterystyki, czyli jest jej poziomem. Taki sam sposób rozumowania prowadzi do wniosku, że U_{pmax} jest poziomem charakterystyki 100-procentowej (praktycznie najmniejsze napięcie, które wywołuje przeskok za każdym razem). Analogicznie U_{p50} jest poziomem charakterystyki 50-procentowej.

Poziom charakterystyki 50-procentowej można wyznaczyć także wprost, regulując tak wartość szczytową udaru, aby np. na 100 doprowadzonych udarów połowa z nich zakończyła się przeskakiem. Łatwo można zauważyć, że wyznaczenie w podobny sposób np. poziomu charakterystyki 0% byłoby, co najmniej bardzo uciążliwe a praktycznie niewykonalne, gdyż należałoby doprowadzić 1000 udarów i stwierdzić 23 przeskoki na obiekcie badanym. Czas takiego pomiaru, a co najważniejsze - czas regulacji generatora byłby bardzo długi. Łatwiej, zatem wyznaczyć całą charakterystykę $p = f(U_p)$ i interesujące napięcia odczytać z wykresu.

1.2. Zasady koordynacji izolacji

Definicja.

Koordinacja izolacji jest to takie stopniowanie wytrzymałości izolacji urządzeń, które zapewnia optymalną pewność ruchu a ewentualne wyładowania ogranicza do miejsc nie zagrażających obsłudze i urządzeniu.

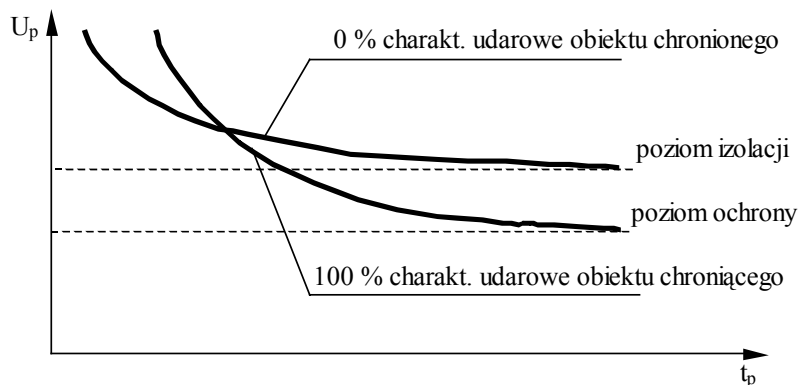
W najprostszym ujęciu definicję tę można zinterpretować opierając się na współzależności między podstawowymi w technice wysokich napięć urządzeniami: obiektem chronionym - ochronnikiem (ogranicznik przepięć), to właśnie ochronnik jest tym miejscem gdzie wyładowanie nie zagraża obsłudze. Jeżeli obiekt chroniony i włączony z nim równolegle ochronnik zostaną zaatakowane przez falę przepięciową o wartości szczytowej U , to - jak wynika z rys. 4.6. - wystąpi na ochronniku przeskok w czasie zawartym w przedziale (t_1, t_2) . Na obiekcie chronionym przeskok mógłby wystąpić dopiero po czasie $t_3 > t_2$, jednakże zadziałanie ochronnika powoduje, że wartość chwilowa napięcia na zaciskach tego obiektu



nie przekroczy wartości bezpiecznej dla jego izolacji, zatem przeskok na nim (lub przebicie) w ogóle nie wystąpi.

Różnica między poziomem izolacji i poziomem ochrony jest marginesem ochrony. We współczesnych sieciach wysokich napięć w Polsce margines ten, liczony w stosunku do poziomu ochrony, wynosi ok. $25 \div 40\%$.

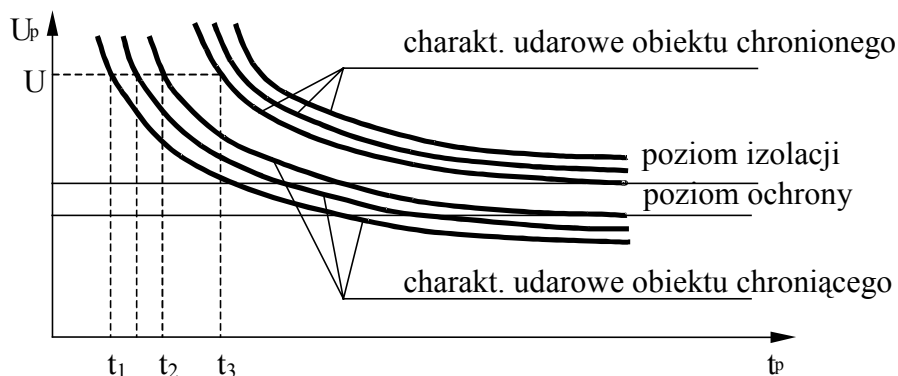
Często w przypadku obiektów, których charakterystyki 0-procentowej i poziomu 0-procentowego nie można wyznaczyć, gdyż przebicie ich jest równoznaczne z ich zniszczeniem (transformator), podaje się tzw. charakterystykę wytrzymywaną, leżącą poniżej przewidywanej charakterystyki 0-procentowej. Charakterystykę tę określa konstruktor na podstawie parametrów użytej izolacji i podlega ona sprawdzeniu podczas prób uderowych obiektu za pomocą dwóch uderów: pełnego i uciętego o wartościach szczytowych określonych w przedmiotowych normach.



Rys. 4.5. Nieprawidłowy przebieg charakterystyki uderowej obiektu chroniącego

Z rozważań tych wynika, że aby ochrona była efektywna, 100-procentowa charakterystyka uderowa ogranicznika przepięć leżeć musi poniżej umownej 0-procentowej charakterystyki uderowej obiektu chronionego w całym zakresie czasów do przeskoku. Można to uprościć, żądając, aby poziom 100-procentowej charakterystyki uderowej ogranicznika przepięć, zwany poziomem ochrony, leżał poniżej poziomu 0-procentowej charakterystyki uderowej obiektu chronionego, zwanego poziomem izolacji. Aby jednak uproszczenie to było możliwe, charakterystyka dolna nie może być bardziej stroma od górnej. Taki warunek spełnia charakterystyka uderowa odgromnika zaworowego. Jest ona płaska w dużym zakresie czasów do przeskoku i dopiero dla $t_p = 0,5 \mu s$ może unieść się o 15% w

stosunku do płaskiego odcinka, gdyż w przeciwnym razie ochrona mogłaby okazać się nieskuteczna w pewnym zakresie czasów do przeskoku (rys. 4.5.).



Rys. 4.6. Wzajemne położenie charakterystyk udarowych obiektu chronionego i ochronnika

1.3. Współczynnik udaru

Definicja.

Współczynnikiem udaru układu izolacyjnego nazywa się stosunek udarowego napięcia przeskoku do wartości szczytowej statycznego (przemennego) napięcia przeskoku w tym układzie.

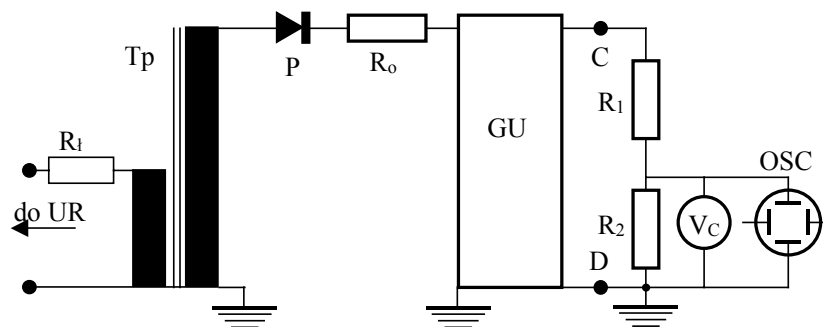
$$k = \frac{U_{p50\%}}{\sqrt{2} U_{st}}$$

Współczynnik udaru jest miernikiem stopnia nierównomierności pola elektrycznego w badanym układzie. W przypadku płaskiego układu elektrod (pole równomierne) $k = 1$, w układach ostrze – ostrze, ostrze – płyta $k > 1$. W układach elektrod z izolacją gazową wartość k zależy także od biegunowości napięcia udarowego bowiem ujemne napięcie przeskoku jest wyższe od dodatniego.

2. POMIARY

2.1. Sprawdzenie kształtu uderu i stabilności działania generatora uderów piorunowych

Schemat połączeń



Rys. 4.7. Schemat połączeń do sprawdzania parametrów generatora uderowego., UR- układ regulacji napięcia, T_p - transformator zasilający, P. - prostownik wysokonapięciowy, R_t, R_o - rezystory ładujące, GU - generator uderowy, R_1, R_2 - dzielnik napięcia, OSC. – oscyloskop wysokonapięciowy, V_c - woltomierz cyfrowy wartości szczytowej, C, D - punkty do których będą podłączone kolejne układy pomiarowe

Jako źródło uderów piorunowych służyć będzie, we wszystkich punktach niniejszego ćwiczenia, czterostopniowy generator Marxa.

Sposób wykonania pomiaru

Należy wykonać dwa zdjęcia uderu:

przy takiej szybkości podstawy czasu, która pozwoli na dokładne określenie czasu trwania czoła T_1 ;

wybierając szybkość podstawy czasu pozwalającą na właściwe określenie czasu do półszczytu T_2 .

Pomierzyć dziesięć wartości szczytowych uderu piorunowego, przy takim samym ustawieniu generatora i niezmiennym napięciu ładowania.

Opracowanie wyników pomiaru

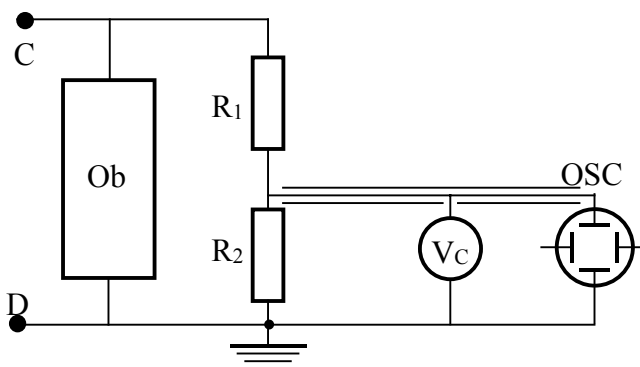
Na podstawie wykonanych zdjęć uderu odczytać jego parametry czasowe: T_1 i T_2 ; w sposób podany w p. 1.3. pierwszej części skryptu. Porównać wyniki pomiarów i obliczeń. Sprawdzić, czy wartość szczytowa poszczególnych uderów

nie różni się o więcej niż $\pm 3\%$ od średniej arytmetycznej wszystkich wartości w serii (PN-75/E - 04061).

2.2. Sprawdzenie prawidłowości kształtu charakterystyk udarowych obiektu chronionego

Schemat połączeń

Przed przystąpieniem do pomiarów należy wyskalować miernik wartości szczytowej według wskazań podanych przez prowadzącego ćwiczenie.



Rys. 4.8. Schemat układu pomiarowego do zdejmowania charakterystyki udarowej. Ob - obiekt chroniony. Pozostałe oznaczenia jak na rys. 4.7.

Sposób wykonania pomiarów

Należy dokonać, co najmniej dziesięciu pomiarów udarowych napięć przeskoku na obiekcie chronionym i odpowiadającym im dziesięciu czasów do przeskoku. Biegunowość i przybliżoną wartość napięcia poda prowadzący ćwiczenie.

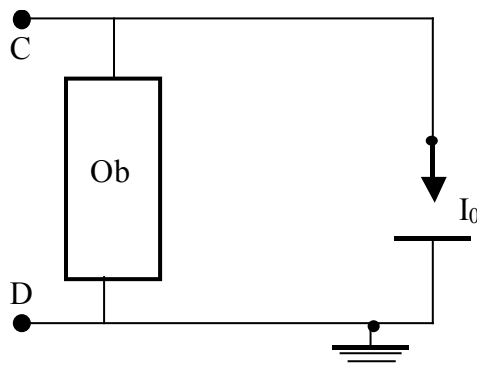
Opracowanie wyników pomiarów

Charakterystyki udarowe obiektu chronionego będą podane przez prowadzącego ćwiczenie w postaci gotowych wykresów (które posłużą również do naniesienia pomierzonych w p. 2.5 charakterystyk udarowych ochronnika i sprawdzenia skuteczności ochrony). Należy sprawdzić, czy punkty o współrzędnych t_{pi} , U_{pi} otrzymanych w wyniku pomiarów leżą wewnątrz pasma ograniczonego charakterystykami 0% i 100%, nanosząc je na rysunek.

2.3. Określenie odstepu elektrod iskiernika chroniącego zapewniającą właściwą ochronę obiektu chronionego

Schemat połączeń

Rolę ochronnika pełni, jak wynika z rys. 4.9, układ ostrze - płyta, który symuluje ochronnik



Rys. 4.9. Schemat układu pomiarowego do określenia właściwego odstepu elektrod iskiernika chroniącego. I_0 - iskiernik chroniący ostrze-płyta. Pozostałe oznaczenia jak na rys. 4.8.

Sposób wykonania pomiaru

Należy eksperymentalnie tak dobrać odległości elektrod iskiernika chroniącego, aby przeskoki występowały tylko na nim bez względu na wartość szczytową uderów doprowadzonych z generatora. Wstępnie ustawić należy odstęp elektrod na „b” [cm] (wartość „b” poda prowadzący ćwiczenie) i doprowadzić serię uderów. Sprawdzenie przerwać, gdy choć jeden przeskok wystąpi na obiekcie chronionym, po czym należy zmniejszyć odstęp elektrod I_0 o 0,5 cm i znów doprowadzić serię uderów. Czynność tę powtarzać należy tak długo, aż wszystkie przeskoki w serii 20÷30 uderów wystąpi na I_0 . Po stwierdzeniu tego stanu rzeczy, należy doprowadzić do układu obiekt chroniony – ochronnik jeszcze dwie serie po 50 uderów; wartość szczytowa uderów pierwszej serii winna być największa, jaką da się uzyskać z generatora, drugiej serii najmniejsza, przy której jeszcze wystąpią przeskoki na którymś z równolegle połączonych obiektów.



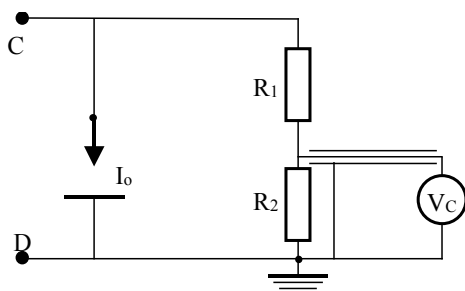
Jeżeli żaden z 100 uderów dwóch ostatnich serii nie spowoduje przeskoku na obiekcie chronionym, uznać można iż odstęp elektrod iskiernika chroniącego został ustalony właściwie.

Opracowanie wyników pomiaru

Podać otrzymany z prób odstęp iskiernika chroniącego $a =$

2.4. Wyznaczenie krzywych prawdopodobieństwa przeskoku układu ostrze - płyta

Schemat połączeń



Rys. 4.10. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania krzywych prawdopodobieństwa przeskoku układu ostrze-płyta. Oznaczenie jak na rys. 4.9.

Sposób wykonania pomiarów

Należy dokonać pomiarów uderowych napięć przeskoku iskiernika ostrze - płyta dla trzech odległości elektrod i obu biegunowości uderu:

- dla uderów o biegunowości, jak w 2.3. i odstępem „a” ustalonego w tym punkcie oraz dwóch innych odstępach podanych przez prowadzącego ćwiczenie,
- dla uderów o biegunowości przeciwnej, niż w p. 2.3. przy odstępach elektrod podanych przez prowadzącego ćwiczenie.

Dla każdej odległości wyznaczyć, co najmniej cztery punkty odpowiadające różnym prawdopodobieństwom przeskoku, przy czym dwa punkty powinny odpowiadać skrajnym prawdopodobieństwom (np. 0,1 i 0,9) oraz inne, możliwie odległe od siebie i od punktów skrajnych. Prawdopodobieństwo przeskoku określać należy na podstawie, co najmniej 30 pomiarów. Należy, regulując wartość

szczytową uderu, przestrzegać zasady ciągłego wzrostu lub ciągłego malenia prawdopodobieństwa przeskoku. Niedopuszczalne jest np. - przy założeniu dokonywania pomiarów przy ciągle rosnących prawdopodobieństwach - obniżenie napięcia tak, aby uzyskać prawdopodobieństwo niższe niż ostatnio uzyskane, gdyż swoista „histereza wyników” może spowodować znaczne błędy pomiarowe. Jeżeli zatem wybierając zasadę rosnących prawdopodobieństw chce się dokonać pomiaru przy prawdopodobieństwie niższym od ostatnio uzyskanego, należy obniżyć napięcie wyjściowe generatora do wartości odpowiadającej prawdopodobieństwu zerowemu i - podwyższając stopniowo napięcie - osiągnąć żądane prawdopodobieństwo.

Opracowanie wyników pomiarów

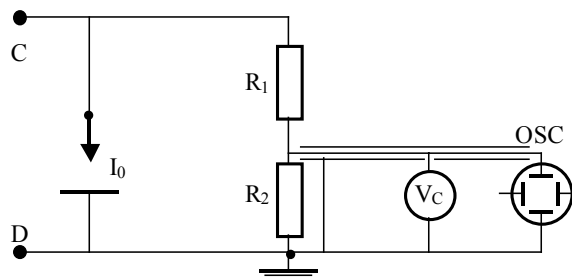
Na podstawie wyników pomiarów obliczyć dla każdej serii pomiarowej średnią wartość napięcia wskazywanego przez miernik wartości szczytowej i (w celu uzyskania średniej wartości napięcia przeskoku) pomnożyć ją przez przekładnię dzielnika U_{oz} .

Wykreślić w siatce funkcyjnej rozkładu normalnego proste wyrażające zależności $p = f(U_i)$ gdzie U_i jest średnią wartością szczytową uderu w tej serii pomiarowej dla poszczególnych odstępów elektrod i obu biegunowości uderu. Proste należy wykreślić stosując metodę najmniejszych kwadratów.

Na podstawie powyższych wykresów wyznaczyć należy uderowe napięcie przeskoku U_p (minimalne 50-procentowe uderowe napięcie przeskoku), oraz narysować na wspólnym dla obu biegunowości uderu, wykresie krzywe $U_p = f(d)$.

Wyznaczanie charakterystyk uderowych iskiernika chroniącego

Schemat połączeń



Rys. 4.11. Schemat układu do wyznaczania charakterystyk uderowych iskiernika chroniącego. Oznaczenia jak na rys. 4.9.

Sposób wykonania pomiarów

Należy dla odstępów elektrod „a” wyznaczonego w p. 2.3 dokonać pomiarów napięcia przeskoku i czasów do przeskoku, w co najmniej dwóch seriach. W obu seriach skok powinien występować na grzbiecie udaru; w pierwszej blisko jego szczytu (np. po $3 \div 4 \mu\text{s}$ licząc od początku udaru), w drugiej dalej od szczytu (np. po $8 \div 10 \mu\text{s}$). Należy jednakże przy doborze zwłaszcza drugiego czasu zwrócić uwagę na konieczność występowania przeskoku na badanym obiekcie za każdym razem. W każdej serii należy wykonać, co najmniej 30 pomiarów.

Opracowanie wyników pomiarów

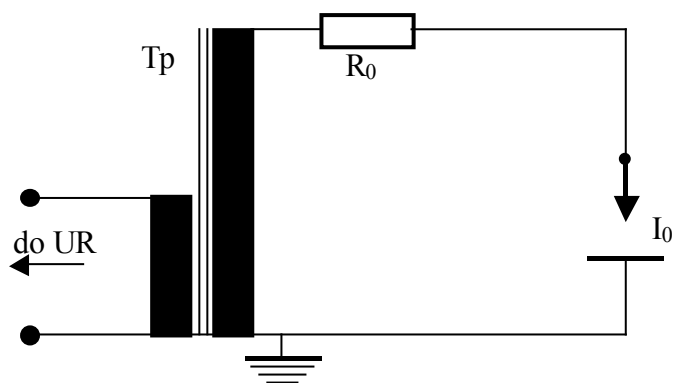
Należy opracować otrzymane wyniki w następujący sposób:

- obliczyć średnią wartość napięcia przeskoku $U_{p\text{sr}}$ w każdej serii pomiarowej,
- zakładając, że rozrzut czasów do przeskoku podlega rozkładowi normalnemu, wyznaczyć w każdej serii $t_{p\text{min}}$, $t_{p\text{sr}}$ i $t_{p\text{max}}$ bądź to ze wzorów analitycznych bądź też z wykresu $p = f(t_p)$. W tym drugim przypadku powyższe czasy będą odpowiadały kolejno: $p = 0,023$, $p = 0,5$ i $p = 0,997$,
- nanieść punkty o rzędnej $U_{p\text{sr}}$ i odciętych: $t_{p\text{min}}$, $t_{p\text{sr}}$, $t_{p\text{max}}$, dla obu serii pomiarowych na wykres zawierający charakterystyki udarowe obiektu chronionego,
- odczytać z wykresu $p = f(U_p)$ wartości poziomów charakterystyk udarowych dla odległości „a” wyznaczonej w p. 2.3. Są to napięcia odpowiadające wartościom prawdopodobieństw: $p = 0,023$, $p = 0,5$, $p = 0,997$. Po naniesieniu tych poziomów na wykres narysować charakterystyki udarowe ochronnika,
- sprawdzić, czy charakterystyka 100% ochronnika leży poniżej 0% charakterystyki obiektu chronionego i obliczyć margines ochrony.

2.6. Pomiar statycznego napięcia przeskoku

Schemat połączeń





Rys. 4.12. Schemat układu do wyznaczania statystycznego napięcia przeskoku. R_0 - opornik ograniczający. Pozostałe oznaczenia jak na rys. 4.7. i 4.9.

Sposób wykonania pomiarów

Należy dokonać 5-krotnego pomiaru statycznego (przemiennego) napięcia przeskoku iskiernika ostrze - płyta (ochronnika) przy odległości elektrod „a” ustalonej w p. 2.3.

Opracowanie wyników pomiarów

Należy obliczyć współczynniki uderu ochronnika.

3. UWAGI I WNIOSKI

ĆWICZENIE 5

BADANIE DIELEKTRYKÓW PŁYNNYCH I STAŁYCH

1. WIADOMOŚCI OGÓLNE

1.1. Przewodność czynna dielektryków

Przez pojęcie przewodności czynnej rozumie się stosunek wartości ustalonej prądu stałego do przyłożonego napięcia. Przewodność dielektryków może mieć charakter jonowy lub elektronowy. W normalnych warunkach dla ogromnej większości dielektryków przewodność ma charakter jonowy. W dielektrykach ciekłych pochodzenie nośników elektryczności wiąże się zasadniczo z obecnością jonowych domieszek. Niektóre ciecze same dysocjują, np. woda i alkohole, tworząc jony OH i H. Należy zauważyć, że ze wzrostem temperatury przewodność dielektryków rośnie.

Wartość prądu upływu daje pewien obraz stanu izolacji zarówno od strony zanieczyszczeń, jak i procesów starzenia elektrochemicznego. Dlatego też przy badaniach kabli i kondensatorów między innymi zdejmuje się charakterystykę prądowo-napięciową.

1.2. Mechanizm pojawiania się napięcia powrotnego

Po chwilowym bezrezystancyjnym zwarcu naładowanego kondensatora może pojawić się napięcie na jego zaciskach. Zjawisko to można wyjaśnić na podstawie schematu zastępczego dielektryku podanego na rys. 5.1.

W celu bliższego opisanie elementów składowych układu zastępczego dielektryku należy zapoznać się ze zjawiskami polaryzacji, zachodzącymi w dielektryku, gdy działa nań pole elektryczne.

Można rozróżnić polaryzacje, które są związane z występowaniem strat dielektrycznych oraz bezstratne. Do tych ostatnich zalicza się polaryzację elektronową i jonową noszące wspólną nazwę polaryzacji deformacyjnej.



Polaryzacja elektronowa polega na przesunięciu, wskutek działania zewnętrznego pola elektrycznego, powłok elektronowych względem dodatnio naładowanych jąder atomów. Środki ciężkości ładunków obu znaków nie pokrywają się, co prowadzi do zaindukowania momentu dipolowego. Ten rodzaj polaryzacji występuje we wszystkich dielektrykach i zachodzi w czasach rzędu 10^{-15} s.

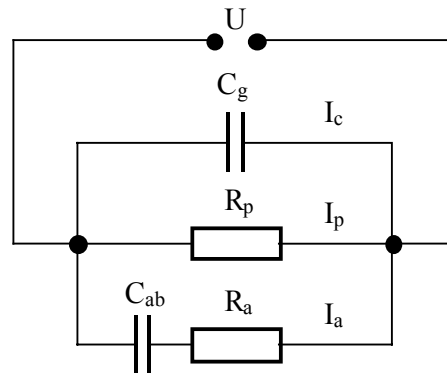
Polaryzacja jonowa zachodzi w ciałach z siatką krystaliczną o wiązaniu jonowym, polegającym na tym, że elektron z powłoki walencyjnej atomu A przechodzi do powłoki walencyjnej atomu B tworząc w ten sposób jon dodatni A^+ i jon ujemny B^- . Wskutek działania pola zewnętrznego następuje sprężyste przesunięcie różnorodnych jonów. Polaryzacja jonowa zachodzi w czasach rzędu 10^{-13} s.

W dielektryku o strukturze dipolowej występuje polaryzacja polegająca na orientacji dipoli, tzw polaryzacja dipolowa. Zachodzi ona w czasie $10^{-10} \div 10^{-2}$ s.

Do wolniej przebiegających rodzajów polaryzacji zaliczamy:

- polaryzację strukturalną występującą w ciałach polikrystalicznych, polegającą na przechodzeniu słabo związanych z zasadniczą strukturą dielektryka jonów z jednego położenia w drugie,
- polaryzację wysokonapięciową (ładunku przestrzennego), polegającą na przemieszczeniu jonów pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego, po zaniknięciu, którego jony rozmieszczają się równomiernie w całym dielektryku,
- polaryzację warstwową występującą w dielektrykach niejednorodnych, polegającą na gromadzeniu się ładunku na powierzchniach granicznych różnie spolaryzowanych części dielektryka, przyczyną powstawania tego ładunku może być także różnica przewodności tych części.

Polaryzacje: dipolowa, strukturalna, wysokonapięciowa i warstwowa charakteryzują się stratami energii w dielektrykach. Straty te reprezentowane są w schemacie zastępczym (rys. 5.1.) przez rezystancję R_a . Wszystkie rodzaje polaryzacji, które zdążą dokonać w jednym półokresie przy danej częstotliwości napięcia przemiennego, określają przenikalność elektryczną materiału. Przeni-



Rys.5.1. Układ zastępczy dielektryku.
 R_p – rezystancja skrośna dielektryku,
 C_g – pojemność geometryczna, C_{ab} –
 pojemność absorpcyjna, R_a – straty
 dielektryczne

kalność, a więc i pojemność zależą od częstotliwości napięcia przemiennego. Przy dużej częstotliwości, kiedy zachodzi tylko polaryzacja deformacyjna, przenikalność elektryczną charakteryzuje sam czysty dielektryk bez domieszek, a pojemność przyjmuje wartość pojemności geometrycznej C_g . Pojemność tę określa się wymiarami geometrycznymi kondensatora i przenikalnością elektryczną dielektryka bez uwzględniania polaryzacji odbywającej się wolno. Przy niewielkich częstotliwościach, przy których w jednym półokresie mogą się dokonać powolniejsze rodzaje polaryzacji, wypadkowa pojemność przyjmuje wartość $C = C_f$ pojemności fizycznej. Różnica pojemności $C_f - C_g = C_{ab}$ określa pojemność zwaną absorpcyjną, która reprezentuje tę część ładunku $Q_{ab} = U \cdot C_{ab}$, która gromadzi się na elektrodach układu przy powolnych rodzajach polaryzacji.

Przejdźmy teraz do wyjaśnienia mechanizmu pojawiania się napięcia powrotu. Jeżeli kondensator z dielektrykiem został naładowany, a następnie zwarty bezrezystancyjnie, to pojemność C_g , związana z szybką polaryzacją, rozładowuje się całkowicie. Natomiast pojemność C_{ab} rozładowuje się przez rezystancję R_a , a więc wolniej, niż C_g . Po rozwarciu kondensatora ładunek zawarty w pojemności C_{ab} rozkłada się również i na pojemność C_g , w rezultacie czego na zaciskach kondensatora pojawia się pewne napięcie. W praktyce taki stan spolaryzowania dielektryka nie trwa długo gdyż obie pojemności rozładują się przez rezystancję R_p , jednak mimo to jest zjawiskiem szkodliwym.

Na pierwszym miejscu trzeba tu wspomnieć o względach bezpieczeństwa. Wskutek pojawiania się po rozładowaniu kondensatora napięcia na jego zaciskach, które swoją wartością może niekiedy znacznie przekroczyć napięcie bezpieczne, należy zwracać uwagę na to, aby każdy kondensator był dostatecznie długo rozładowywany.

1.3. Przebicie dielektryków ciekłych

1.3.1. Rodzaje dielektryków ciekłych

Do dielektryków ciekłych zaliczamy:

1. Oleje mineralne – pochodne produkty destylacji ropy naftowej; główne składniki – to: węglowodory naftowe, parafinowe, aromatyczne związki o charakterze nienasyconym. Charakteryzują się wysoką wytrzymałością elektryczną, dobrą współpracą z innymi rodzajami izolacji, zdolnością gaszenia łuku elektrycznego.

2. Oleje syntetyczne – chlorowane oleje polifenylowe. Charakteryzują się niepalnością, wysoką wytrzymałością elektryczną (200 kV/mm), dużą odporno-



ścią na starzenie oraz znaczną przenikalnością dielektryczną ($\epsilon' = 5$). Stosowane są przeważnie w kondensatorach. Ich nazwy firmowe: sowol, clophen, piranol.

3. Oleje silikonowe – odporne na wysokie temperatury i mające niskie temperatury krzepnięcia.

1.3.2. Mechanizm przebicia dielektryków ciekłych

Mechanizm przebicia dielektryków ciekłych nie jest tak dobrze znany jak w przypadkach gazów. Rozróżniamy mechanizm mostkowy i jonizacyjny przebicia dla oleju technicznego (stosowanego w układach izolacyjnych urządzeń wysokiego napięcia). Pierwszy z nich występuje w olejach silnie zanieczyszczonych, przy niewielkich odległościach między elektrodami rzędu milimetrów. Czasy do przebicia są rzędu sekund i minut. Znajdujące się w oleju włókienka, posiadające dzięki wchłoniętej przez nie wodzie wysoką wartość przenikalności elektrycznej, przemieszczają się pod wpływem działania sił pola w kierunku obszarów o dużych natężeniach pola. Skupiając się między elektrodami powodują tworzenie się mostków, silnie zniekształcających pole i obniżających wytrzymałość przerwy międzyelektrodowej.

Mechanizm jonizacyjny występuje głównie w olejach oczyszczonych, lecz niezbyt dobrze odgazowanych. W pęcherzykach gazowych może dojść do przekroczenia krytycznej wartości natężenia pola. Elektron potrzebny do zapoczątkowania rozwoju lawiny może powstać w wyniku oddziaływania zewnętrznych czynników jonizacyjnych lub też może być emitowany z katody. Zjonizowany pęcherzyk gazowy przedstawia jak gdyby przewodzące ostrze. Dalszy rozwój wyładowania może odbywać się przez wydłużenie pęcherzyka na skutek rozkładu oleju nagrzanego przez wyładowania lub przez jonizację w oleju przed końcem zjonizowanego pęcherzyka.

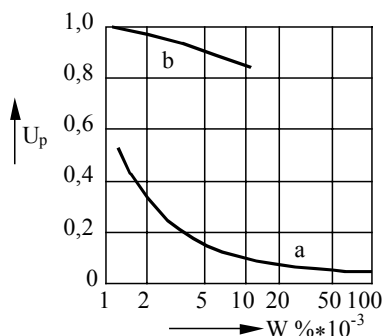
Dla olejów dobrze oczyszczonych i odgazowanych decydujący może być mechanizm strimerowo – liderowy, podobny do mechanizmu przeskoku w dużych odstępach powietrznych.

1.3.3. Wpływ różnych czynników na wytrzymałość olejów

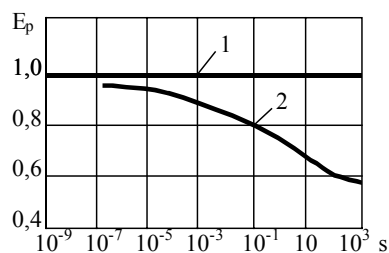
Do ważniejszych czynników mających wpływ na wytrzymałość oleju zaliczamy:

- długość drogi przebicia,
- kształt i materiał elektrod,
- zawartość wody,
- zanieczyszczenie,
- temperaturę i ciśnienie.





Rys. 5.2. Wpływ zawartości wody na wytrzymałość oleju: a) zanieczyszczony, b) dobrze oczyszczony



Rys. 5.3. Zależność wytrzymałości oleju od czasu przyłożonego napięcia. 1 - olej transformatorowy oczyszczony, 2 - olej techniczny zawilgocony

Przy wzroście drogi przebiecia średnie naprężenie przebiecia maleje. Im mniejszy jest promień elektrod (im bardziej niejednostajne jest pole elektryczne), tym wytrzymałość jest mniejsza. Zawartość wody i zanieczyszczenia są czynnikami, które mają największy wpływ na wytrzymałość oleju; związane to jest z polepszeniem się warunków do tworzenia się mostków. Rys. 5.2. pokazuje wpływ zawartości wody na wytrzymałość oleju dla oleju zanieczyszczanego i bardzo dobrze oczyszczanego. Należy podkreślić, że zawartość wilgoci i domieszek mechanicznych przy oddziaływaniu napięć uderowych wywiera mały wpływ na wytrzymałość elektryczną oleju. Ze wzrostem czasu oddziaływania napięcia, wpływ wody i zanieczyszczeń się zwiększa, co pokazano na rys. 5.3.

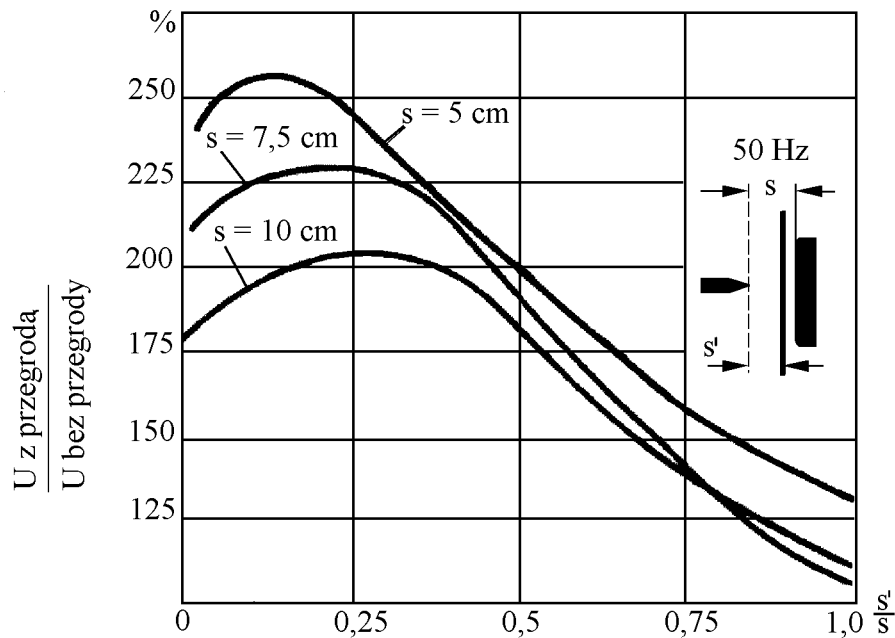
Na wytrzymałość olejów technicznych przy napięciu stałym i napięciu 50 Hz znaczny wpływ wywiera ich temperatura. Przy wzroście temperatury część wody przechodzi z włókien do oleju, dzięki czemu maleje przenikalność elektryczna włókien, a więc maleje skłonność do tworzenia się mostków. Dlatego też wytrzymałość oleju wzrasta osiągając maksimum przy temperaturze $60 \div 70^\circ\text{C}$. W temperaturach wyższych wytrzymałość zaczyna maleć na skutek wytwarzania się większej ilości pęcherzyków gazu, które stają się ośrodkami zapoczątkowującymi przebiecie. Dla olejów dobrze oczyszczonych wytrzymałość jest niezależna od temperatury w granicach od 0° do 90°C . Przy wzroście ciśnienia maleje liczba i wymiary pęcherzyków gazowych zawartych w oleju, i wytrzymałość oleju wzrasta.



1.4. Współpraca olejów z dielektrykami stałymi

Można wyróżnić dwa rodzaje współpracy olejów ze stałymi materiałami izolacyjnymi:

- użycie materiałów stałych jako bariery na drodze przebicia,
- zastosowanie olejów jako syciwa w izolacji papierowej.



Rus. 5.4. Wpływ przegród izolacyjnych na napięcie przebicia oleju w polu wybitnie niejednorodnym

Zastosowanie przegród z materiału stałego w układach z izolacją olejową podwyższa ich wytrzymałość przy napięciu 50 Hz. Wzrost wytrzymałości przy napięciu jest tym większy, im bardziej niejednorodne jest pole wzdłuż drogi przebicia. Na rys. 5.4. przedstawiono wpływ przegród izolacyjnych na napięcie przebicia oleju w polu wybitnie niejednorodnym. Wzrost wytrzymałości spowodowany jest utrudnieniem tworzenia się mostków ułatwiających przebicie. Stosowane przegrody mają stosunkowo cienkie ścianki.

Oleje izolacyjne są szeroko stosowane jako syciwa izolacji papierowej. Pozwalają one znacznie zwiększyć wytrzymałość elektryczną papieru, zmniejszyć współczynnik stratności dielektrycznej $\text{tg}\delta$ oraz zwolnić szybkość starzenia się papieru pod względem mechanicznym. Papier posiada niską wytrzymałość elek-

tryczną ze względu na znaczną niejednorodność budowy oraz higroskopijność. Rola oleju jako syciwa sprowadza się do wypełnienia w papierze pustych przestrzeni. Im mniejsza jest różnica między wartością przenikalności elektrycznej celulozy a wartością przenikalności syciwa, tym materiał staje się pod względem elektrycznym bardziej równomierny.

1.5. Przebiecie dielektryków stałych

Wykaz ważniejszych dielektryków stałych i ich własności podaje tabela 5.1.

Tabela 5.1. Ciężar właściwy, przenikalność elektryczna oraz $\operatorname{tg} \delta$ niektórych dielektryków płynnych i stałych.

Rodzaj	G [g/cm ³]	ϵ'	$\operatorname{tg} \delta$
Olej transformatorowy	0,88 – 0,89	2,2 – 2,45	0,0007
Olej kablowy syntetyczny	0,87	2,2 – 2,5	0,009
Sowoł	1,54 – 1,58	5,1 – 5,2	0,0045
Szelak	1,0 – 1,04	2,8 – 3,5	0,008 – 0,01
Polichlorek winylu	1,35 – 1,4	3,3 – 5,3	0,01 – 0,05
Żywica epoksydowa	1,2 – 1,3	3,7 – 3,9	0,00-16 – 0,004
Getinaks A (PFE3) – arkusze	1,3 – 1,78	6,0 – 8,0	0,06 – 0,1
Tekstolit szklany – arkusze	1,65 – 1,85	7,0 – 8,0	0,05 – 0,09
Getinaks – rury i kształtki	1,1 – 1,2	3,5 – 5,0	0,007 – 0,03
Tekstolit szklany	1,3 – 1,4	3,0 – 4,0	0,03 – 0,07
Papier el-en nienasycony	0,08 – 1,17	2,0 – 2,3	0,002 – 0,003
Papier el-en nasycony olejem kablowym	0,08 – 1,17	3,5 – 4,3	0,02 – 0,025
Preszpan miękki celulozowy nasycony olejem naftowym	0,85 – 1,2	4,5 – 5,0	0,015
Szkło elektrotechniczne sodowo-wapniowe	2,4 – 2,5	6,0 – 7,2	0,009 – 0,01
Porcelana twarda wysokonapięciowa	2,2 – 2,5	5,0 – 6,5	0,02 – 0,03
Ultraporcelana	2,8 – 3,0	7,0 – 8,0	0,0005 – 0,001

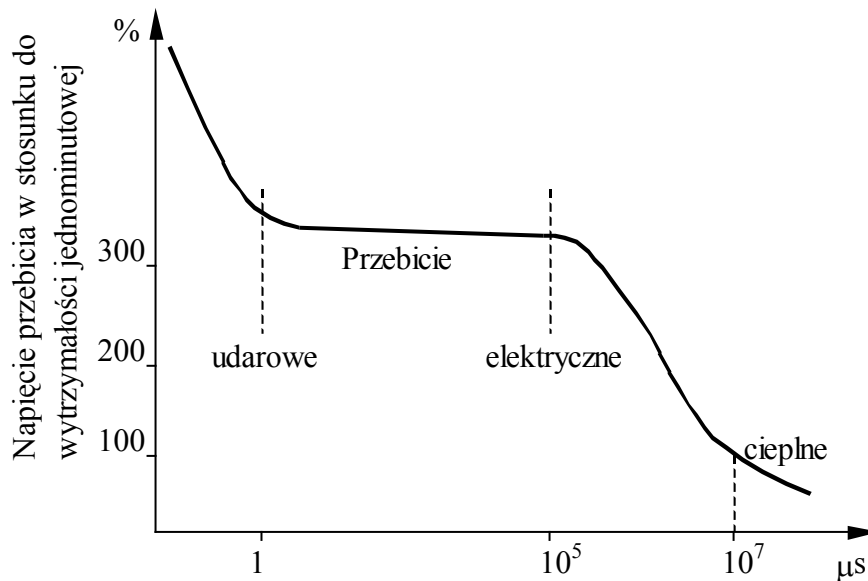
Mechanizmy przebiecia dielektryków stałych można podzielić na:

- elektryczny,
- cieplny,
- wyładowań niezupełnych,
- chemiczny.

Należy zaznaczyć, że rodzaj mechanizmu przebiecia zależy w dużym stopniu od czasu przyłożenia napięcia. Obrazuje to, rys. 5.5, przedstawiający zależność



napięcia przebicia od czasu przyłożenia napięcia dla preszpanu zanurzonego w oleju izolacyjnym.



Rys. 5.5. Zależność napięcia przebicia preszpanu zanurzonego w oleju izolacyjnym od czasu przyłożenia napięcia

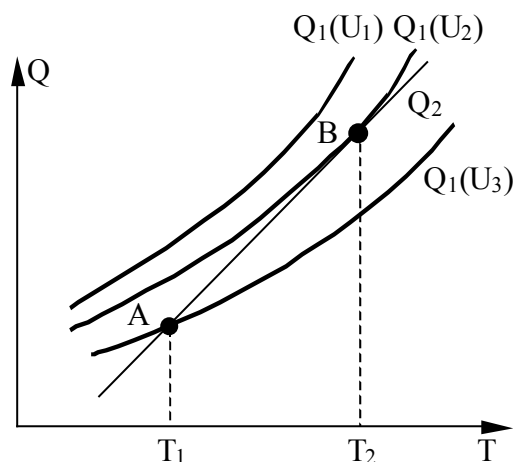
Mechanizm przebicia elektrycznego występuje przy silnych polach elektrycznych. Czas rozwoju przebicia jest rzędu mikrosekund. Czysto elektryczny mechanizm przebicia dielektryków stałych, oparty o ruch swobodnych elektronów, ich oddziaływanie z cząstkami materii daje się opisać tylko dla czystych dielektryków o prostszych strukturach krystalicznych. Wytrzymałość przy elektrycznym mechanizmie przebicia nazywa się wytrzymałością istotną (swoistą, właściwą). Wytrzymałość ta różni się jednak w znacznym stopniu od wytrzymałości praktycznej. W tabeli 5.2. podano zestawienie wytrzymałości elektrycznej dla dielektryków stałych.

Przebiecie cieplne jest najczęściej rozpoznany mechanizmem przebicia dielektryków stałych. Koncepcję mechanizmu tego przebicia podał Wagner. Według tej koncepcji występuje wzajemna konkurencja pomiędzy ciepłem Q_1 wytwarzanym wskutek przewodnictwa elektrycznego i strat dielektrycznych a ciepłem Q_2 oddawanym przez układ (rys. 5.6.). Układ może pracować w punkcie, gdzie występuje równość między ciepłem wytwarzanym a oddawanym, a więc

dla napięcia U_3 w punkcie A, a dla napięcia U_2 w punkcie B. Z rys. 5.6 widać, że napięcie U_2 jest najwyższym napięciem, przy jakim układ może pracować. Jeżeli napięcie wzrośnie do wartości U_1 , ze względu na to, że ciepło wytwarzane jest większe od oddawanego, temperatura układu będzie wzrastała aż do zniszczenia układu. Zachwianie równowagi termicznej jest możliwe tylko wtedy, gdy ze wzrostem temperatury wzrastają straty w dielektryku. Wielkością charakteryzującą straty dielektryczne jest współczynnik strat $\tan \delta$. Wzrasta on w sposób wykładniczy ze wzrostem temperatury.

Tabela 5.2. Zestawienie wytrzymałości istotnej i praktycznej kilku dielektryków stałych

Rodzaj dielektryku	Wytrzymałość	
	Praktyczna	Istotna
	$\times 10^6$ V/cm	
Mika	0,5 – 2,0	9,4 – 14
Polistyren	0,4 – 0,6	6,0 – 7,5
Szkło	0,25 – 0,45	2,0 – 6,0
Kauczuk	0,025	0,6 – 1,0
Octan celulozy	0,32 – 1,0	2,3



Rys. 5.6. Ciepło Q_1 wydzielane w dielektryku (przy różnych napięciach $U_1 > U_2 > U_3$) i ciepło odprowadzane Q_2 do otoczenia w funkcji temperatury

Temperatura otoczenia ma bardzo istotny wpływ na ciepło oddawane przez układ. Wzrost tej temperatury obniża napięcie przebicia dielektryku. Maksymal-

ne napięcie, które może być przyłożone do układu izolacyjnego nie wywołując jego cieplnego przebiccia, nazywa się napięciem granicznym:

$$U_{gr} = k_w \sqrt{\frac{\lambda}{p_t \sigma}},$$

gdzie:

k_w – współczynnik liczbowy zależny od kształtu elektrod i sposobu oddawania ciepła,

p_t – straty jednostkowe w temperaturze t ,

σ – temperaturowy współczynnik strat,

λ – przewodność cieplna $\left[\frac{W}{cm^2 \cdot ^\circ C} \right]$.

Dla pól jednorodnych stratność jednostkową p_t można obliczyć ze wzoru:

$$P_t = 5,56 \cdot 10^{-7} f \varepsilon' \operatorname{tg} \delta \left[\frac{W/cm^3}{kV/cm^2} \right].$$

Wartość granicznego napięcia zależy od rodzaju dielektryku i warunków chłodzenia.

Należy zwrócić uwagę, że wartość napięcia granicznego zależy w dużym stopniu od częstotliwości. W związku z tym duża liczba dielektryków, stosowanych przy napięciu przemiennym o częstotliwości 50 Hz, nie nadaje się do pracy przy napięciach o wysokich częstotliwościach.

Przebicie dielektryku stałego w wyniku oddziaływania wyładowań niezupełnych (wnz) występuje w przypadku, gdy w czasie ich wytwarzania lub też budowy układu izolacyjnego dojdzie w nich do powstania rozwarstwień, pęknięć lub wtrąceń gazowych. W tych przestrzeniach gazowych mogą rozwinąć się wnz ze względu na wyższe natężenia pola elektrycznego niż w dielektryku oraz mniejszą wytrzymałość elektryczną gazu. Szkodliwe oddziaływanie wnz na materiały izolacyjne przypisuje się następującym czynnikom:

- bombardowaniu ścianek wtrąceń gazowych przez elektrony i jony,
- wzrostowi temperatury dielektryku w miejscu oddziaływania wnz,
- oddziaływaniu chemicznemu aktywnych gazów oraz związków chemicznych powstałych w wyniku rozkładu chemicznego dielektryku i reakcji ze składnikami atmosfery wtrąciny,
- promieniowaniu o wysokiej energii oraz ultrafioletowemu, lokalnemu spiętrzeniu pola elektrycznego wywołanego elektronami i jonami osiadającymi na ściankach dielektryku.



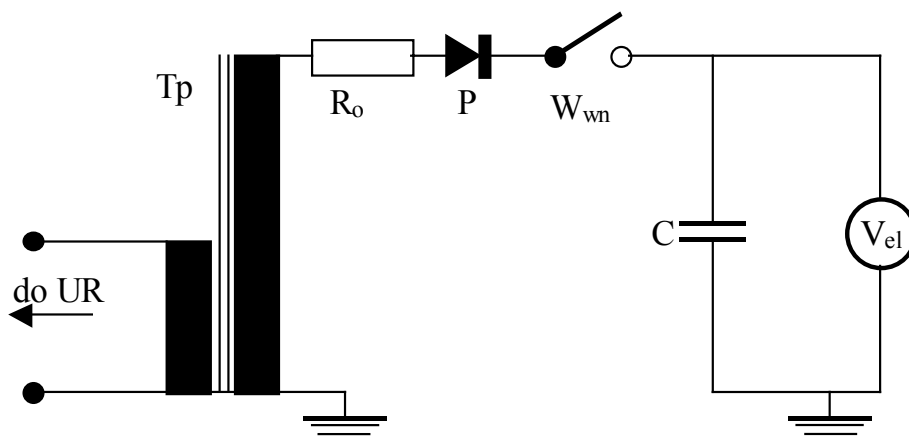
Wszystkie te procesy prowadzą do powolnej utraty właściwości izolacyjnych dielektryku w miejscu gdzie występują wzn a w końcowym stadium do jego przebicia.

Przebicie chemiczne występuje na skutek zniszczenia własności izolacyjnych dielektryku w wyniku zmian chemicznych i fizycznych, spowodowanych przepływem prądu przez dielektryk. Przebicia tego typu występują przy napięciu stałym, przede wszystkim w kondensatorach z izolacją papierową impregnowaną olejami syntetycznymi.

2. POMIARY

2.1. Pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej, metodą samorozładowania, izolacji papierowej impregnowanej

Schemat połączeń



Rys. 5.7. Schemat układu pomiarowego do zdejmowania charakterystyk prądowo-napięciowej.

UR – układ regulacji napięcia, T_p – transformator probierczy, R_o – rezystor ograniczający, P – prostownik, C – kondensator badany (5000 pF), V_{el} – woltomierz elektrostatyczny, W_{wn} – wyłącznik wysokiego napięcia

Sposób wykonania pomiarów

Do izolacji badanego kondensatora, należy przyłożyć napięcie stałe, którego wartość poda prowadzący ćwiczenie. Przy zamkniętym wyłączniku W_{wn} włączyć napięcie, a następnie stopniowo je podwyższać do podanej wartości (odczyt wartości napięcia na V_{el}). Odłączyć napięcie zasilające, dokonać odczytów wartości napięcia panującego na badanym kondensatorze w funkcji czasu. Należy dokonać dziesięciu odczytów wartości napięcia i czasów odpowiadających tym wartościom. Wyniki pomiarów należy ująć w tabeli.

Oprnawowanie wyników pomiarów

Wykreślić charakterystykę prądowo-napięciową $I_u = f(U)$ badanego kondensatora oraz znaleźć rezystancję izolacji R_i . Wartości rezystancji R_i i wartości prądu upływu I_u należy określić w następujący sposób: Charakterystykę $U = f(t_s)$ należy podzielić na części tak, aby każdej z nich odpowiadał jednakowy przyrost napięcia ΔU , równy np. 1 kV. Czyniąc założenie, że w każdym przedziale napięcie zmienia się zgodnie z zależnością:

$$U_t = U_o e^{-\frac{t_s}{T}}$$

gdzie: T – stała czasu rozładowania (T ma wartość stałą w rozpatrywanym przedziale zmian napięcia U_t, U_o),

U_o, U_t – wartość napięcia na początku i na końcu danego przedziału, $\Delta U = U_o - U_t$,

Rezystancję R_i oraz prąd upływu I_u oblicza się z następujących wzorów:

$$R_i = \frac{U_o \Delta t_s}{\Delta U C}, \quad I_u = \frac{C \Delta U}{\Delta t_s},$$

gdzie: C oznacza pojemność badanego kondensatora.

Wyniki obliczeń należy ująć w tabeli. Podać przykład obliczeń.

2.2 Charakterystyka czasowa zmian napięcia pojawiającego się na zaciskach kondensatora po jego uprzednim bezrezystancyjnym rozładowaniu

Schemat połączeń

Schemat połączeń jak w p. 2.1.



Sposób wykonania pomiarów

Należy naładować kondensator C do napięcia U_0 (wartość tego napięcia poda prowadzący ćwiczenie), wyłączyć zasilanie (spowoduje to rozwarcie styków wyłącznika W_{wn}), następnie rozładować go bezrezystancyjnie drążkiem uziemiającym. Po rozładowaniu kondensatora należy zdjąć krzywą zmian $U = f(t)$, gdzie U określa napięcie występujące na kondensatorze wskutek pojawienia się na jego okładzinach ładunku szczątkowego.

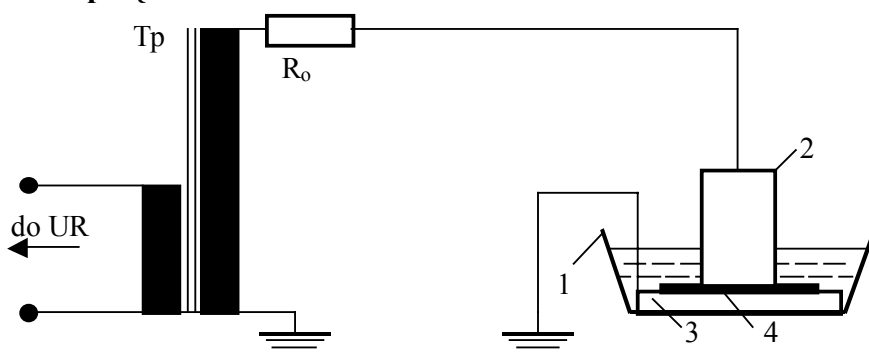
Pomiary należy wykonać dla następujących czasów zwarcia bezrezystancyjnego: 1s i 10s. Szybkość wzrostu napięcia na kondensatorze w czasie jego ładowania winna wynosić 1 kV/s. Po osiągnięciu napięcia o wartości U_0 odczekać 10 s a następnie wykonać pomiar.

Opracowanie wyników pomiaru

Wykreślić krzywą zmian napięcia szczątkowego w funkcji czasu. Wartości należy podać w procentach wartości napięcia ładowania kondensatora C . Czas liczony jest od chwili rozwarcia biegunów kondensatora po jego rozładowaniu (tj. od chwili zdjęcia drążka uziemiającego). Wyniki pomiarów i obliczeń ująć w tabeli.

2.3. Wyznaczenie charakterystyki wytrzymałości papieru kablowego w funkcji liczby warstw papieru

Schemat połączeń



Rys. 5.8. Schemat układu pomiarowego do zdjęcia charakterystyki wytrzymałości papieru kablowego w funkcji liczby warstw papieru. R_o – rezystor ograniczający, 1 – wanna wypełniona olejem izolacyjnym, 2,3 – elektrody, 4 – papier kablowy.

Pozostałe oznaczenia jak na rys. 5.7.

Sposób wykonania pomiaru

Pomiary należy wykonać dla układów złożonych kolejno z $2 \div 6$ warstw papieru kablowego. Dla każdej grubości izolacji (liczba warstw papieru) należy wykonać, co najmniej 5 pomiarów napięć przebicia. W celu obliczeń średnich naprężeń przebicia należy pomierzyć w kilku miejscach, (co najmniej pięciu) grubość badanej izolacji.

Opracowanie wyników pomiaru

Jako wynik pomiarów należy podać charakterystyki wytrzymałości $E_{p\dot{s}r} = f(n)$ i $U_{p\dot{s}r} = f(n)$ w funkcji liczby warstw papieru.

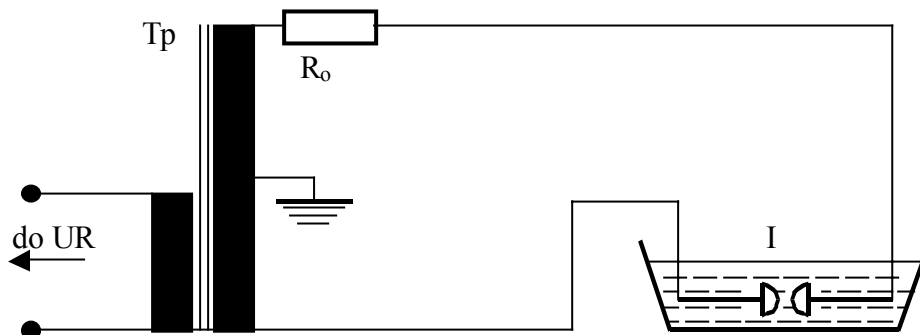
$$E_0 = \frac{U_p}{a}$$

gdzie: U_p – napięcie przebicia,
 a – grubość izolacji.

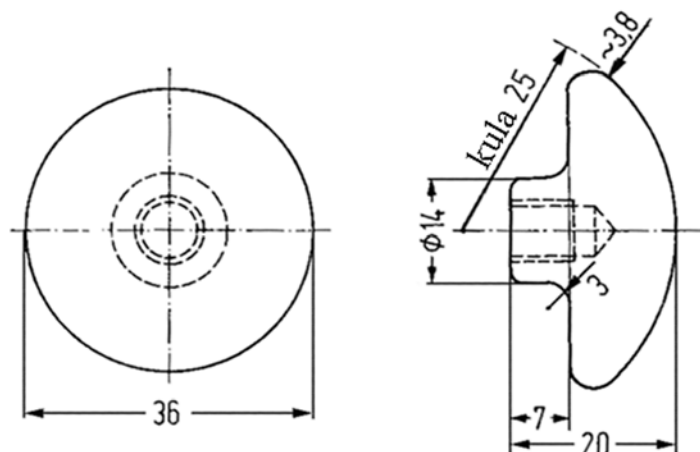
Dla punktów $E_{\dot{s}r} = f(n)$, wyznaczonych na podstawie, co najmniej pięciu pomiarów, należy wyznaczyć przedziały $E_{\dot{s}r} - \Delta E_{\dot{s}r}$, $E_{\dot{s}r} + \Delta E_{\dot{s}r}$, w których z prawdopodobieństwem, $p = 0,95$ zawierają się naprężenia powodujące przebicie papieru kablowego (patrz rozdział „Opracowanie wyników doświadczeń”). Wyniki pomiarów i obliczeń należy ująć w tabeli.

2.4. Porównanie wytrzymałości elektrycznej oleju zawilgoconego i niezawilgoconego

Schemat połączeń



Rys. 5.9. Schemat układu pomiarowego do badania wytrzymałości elektrycznej oleju, I - znormalizowany iskiernik pomiarowy. Pozostałe oznaczenia jak na rys. 5.7 i 5.8.



Rys. 5.10. Jedna z dwóch czasz znormalizowanego iskiernika do badania wytrzymałości oleju. Odstęp czasz 2,5 mm. Współczynnik niejednorodności pola $\beta = 1,03$

Sposób wykonania pomiarów

Dokonać pomiaru napięcia przebicia oleju izolacyjnego stosując układ elektrod o wymiarach zgodnych z wymaganiami PN-58/E-04408 (rys. 5.10). Pomiaru wytrzymałości należy dokonać dla oleju, niezawilgoconego oraz oleju zawilgoconego (przez wpuszczenie do naczynia z olejem 2-4 kropli wody i staranne wymieszanie). W obu przypadkach do pomiarów użyć należy tego samego oleju izolacyjnego. Dla każdego rodzaju oleju wykonać sześć pomiarów napięcia przebicia. Po każdym przebiciu olej starannie wymieszać (patrz odpowiednie wskazówki w PN-58/E-04408).

Opracowanie wyników pomiaru

Wartość napięcia przebicia $U_{p\text{sr}}$ określić na podstawie sześciu wartości napięć przebicia. Naprężenie przebicia wyznaczyć z poniższego wzoru.

$$E = \frac{U_{p\text{sr}}}{a} \beta_s$$

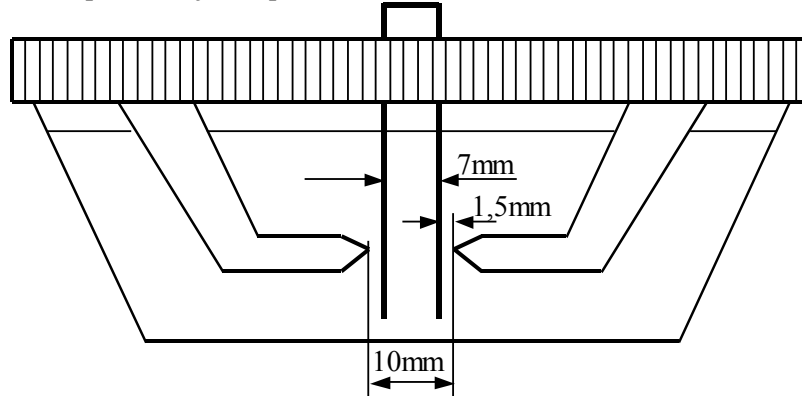
gdzie: β_s - współczynnik niejednorodności pola układu kulowego.

Wyniki pomiarów i obliczeń podać w tabeli.

2.5. Stwierdzenie wpływu przegród na zwiększenie wytrzymałości elektrycznej oleju zawilgoconego

Schemat połączeń

Schemat połączeń jak w p. 2.4



Rys. 5.11. Usytuowanie przegrody między elektrodami iskiernika

Sposób wykonania pomiaru

Dokonać trzykrotnie pomiaru napięcia przebicia układu ostrzowego o odstęp $a = 10$ mm, zanurzonego w zawilgoconym oleju izolacyjnym, w odstępach jednonumitowych (zawilgocenie należy wykonać tak jak podano w p. 2.4). Następnie stosując przegrody izolacyjne, usytuowane jak na rys. 5.11, należy przyłożyć napięcie do układu zwiększając je aż do momentu uzyskania przesko-ku lub do górnej wartości napięcia transformatora probierczego, tj. do $U=50$ kV, po czym należy napięcie niezwłocznie wyłączyć.

Opracowanie wyników pomiaru

Wyniki pomiarów i obliczeń umieścić w tabeli.

2.6. Wizualne stwierdzenie tworzenia się w polu elektrycznym w oleju izolacyjnym mostków przewodzących ułatwiających przebicie oleju

Schemat połączeń

Schemat połączeń jak w p. 2.4.

Sposób wykonania pomiaru

Do wanny szklanej napełnionej olejem izolacyjnym należy wrzucić skrawki papieru, a następnie wymieszać olej, aby je w nim równomiernie rozprowadzić. Następnie do układu ostrzowego, zanurzonego w wannie z olejem izolacyjnym należy przyłożyć napięcie przemienne (wartość napięcia poda prowadzący ćwiczenie) ciągle obserwować ruch znajdujących się w oleju skrawków papieru. Doświadczenie należy wykonać dwukrotnie, z suchymi skrawkami papieru oraz zawilgoconymi.

Opracowanie wyników pomiaru

Opisać i podać wyjaśnienie zaobserwowanych zjawisk.

3. UWAGI I WNIOSKI



ĆWICZENIE 6

BADANIE PRZEBIEGÓW FALOWYCH W LINIACH DŁUGICH

1. WIADOMOŚCI OGÓLNE

1.1. Uwagi wstępne

Ogólnie rzecz biorąc, linia przesyłowa jest tworem przestrzennym, przy czym podporządkować można każdemu elementowi Δz linii pewną rezystancję ΔR i indukcyjność ΔL oraz upływność ΔG i pojemność ΔC . Można zatem mówić o przestrzennym rozłożeniu wartości ΔR , ΔL , ΔG , ΔC ; stąd termin: stałe rozłożone.

Bardzo często podany wyżej obraz można wyidealizować i rozpatrywać jako posiadający elementy skupione, tj. elementy o wymiarach przestrzennych równych zero, cechujące się stałymi skupionymi R , L , G , C .

Sposób przedstawiania linii zależy od rodzaju badanych zjawisk, a ściślej mówiąc – od częstotliwości przebiegów elektrycznych w linii. Dopuszczalne jest użycie schematów zastępczych o stałych skupionych w przypadku, gdy długość fali napięcia lub prądu jest dużo większa od długości linii, tzn. że w każdym punkcie linii panuje w przybliżeniu takie samo napięcie i przez każdy element szeregowy ΔR i ΔL płynie ten sam prąd. Można udowodnić, przyjmując np. różnicę napięć w danej chwili czasowej między końcami odcinka o długości l nie przekraczającej 10%, że graniczna długość odcinka linii, który można zastąpić stałymi skupionymi, powinna wynosić:

$$l \leq \frac{\lambda_g}{60}$$

gdzie: λ_g – długość fali napięcia.



Łatwo stwierdzić, że dla $f_g = 2 \cdot 10^7$ Hz przy $c = c_0 = 300$ m/ μ s $\lambda_g = 15$ m oraz $1 \leq 25$ cm, zaś dla częstotliwości $f_g = 2 \cdot 10^6$ Hz $1 \leq 2,5$ m. Dłuższe odcinki linii nie mogą już być przedstawione w postaci schematu zawierającego stałe skupione.

Najlepszą ilustracją konieczności stosowania schematów zastępczych linii w postaci stałych rozłożonych są przebiegi udarowe, zwłaszcza udary ucięte. Jeśli długość fali udarowej jest mniejsza od długości linii, po której ta fala się porusza, jest rzeczą oczywistą, że każdy punkt tej linii w danej chwili znajdzie się pod różnym potencjałem względem ziemi bądź to ze względu na zmienność napięcia wynikającą z samego kształtu fali, bądź też z prostego faktu, że odcinek linii, na którym fala znajduje się w danej chwili posiada pewien potencjał względem ziemi, podczas, gdy odcinek, do którego fala jeszcze nie doszła posiada potencjał względem ziemi równy zeru. Mowa tu oczywiście o potencjałach wynikających z przebiegów falowych, nie zaś z napięcia pracy.

Można udowodnić, że dla udaru uciętego o długości 0,1 μ s jako odcinek o stałych skupionych można traktować 25 cm linii, jeśli przyjąć wzmiankowaną już częstotliwość graniczną $f_g = 2 \cdot 10^7$ Hz jako składową o największej częstotliwości, która się jeszcze uwzględnia po rozłożeniu udaru na szereg Fouriera. Oczywiście długości czasowe fal rejestrowanych podczas normalnej eksploatacji są wielokrotnie większe od 0,1 μ s, ale też długości linii przekraczają o kilka rzędów wielkości 25 cm wyżej podane. W efekcie w przypadku przebiegów udarowych w liniach przesyłowych linie te rozpatrujemy zawsze przy pomocy schematów o stałych rozłożonych.

W świetle powyższych rozważań jest jasne, że skoro fala nie obejmuje jednocześnie całej linii, nie można mówić o impedancji linii w takim sensie, w jakim to zwykło się mówić w przypadkach, gdy rozpatruje się przebiegi elektryczne o niskich częstotliwościach. Jak wynika z rozwiązania równań linii długiej, parametrem charakteryzującym tę linię jest tzw. impedancja falowa, której wartość wylicza się ze wzoru uproszczonego:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

w którym pominięto wpływ rezystancji wzdłużnej i upływności a zatem dotyczącym tzw. linii bez strat.

Impedancja falowa jest niezależna od długości linii, a jedynie od jej wymiarów poprzecznych. Wynika stąd wniosek, że zmiana rodzaju linii oznacza jednocześnie skokową zmianę impedancji falowej Z , a punkt połączenia dwóch rodzajów linii jest jednocześnie punktem nieciągłości Z . Jeśli fala znajdzie się w



pewnej chwili, po przekroczeniu punktu węzłowego, na obu liniach, to inaczej się będzie zachowywała na jednej linii, inaczej na drugiej.

Impedancję Z można wyliczyć znając wymiary oraz ε ośrodka danego układu przesyłowego; i tak np. dla układu kabla koncentrycznego:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln \frac{R}{r}}, \quad L = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{R}{r}$$

$$\mu = \mu_0 \mu',$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon',$$

biorąc $\mu' = 1$ otrzymamy:

$$Z = 138 \frac{1}{\sqrt{\varepsilon'}} \ln \frac{R}{r}$$

Drugą wielkością charakteryzującą linię długą jest prędkość poruszania się fali. Można wyliczyć ją z następującej zależności:

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon' \mu'}} = \frac{300}{\sqrt{\varepsilon'}} [\text{m}/\mu\text{s}]$$

gdzie: c_0 – prędkość światła, 300 m/ μ s,

ε' – względna przenikalność dielektryczna,

μ' – względna przenikalność magnetyczna, dla powietrza i dielektryków $\mu' = 1$.

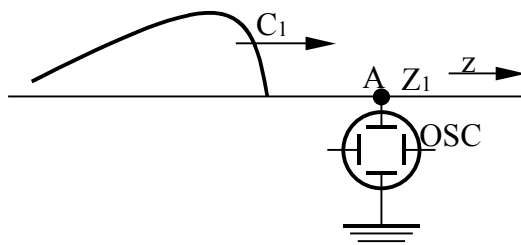
Przy rozpatrywaniu linii długiej zaatakowanej falą napięciową posługujemy się równaniami telegrafistów, które przedstawiają napięcie i prąd jako funkcję dwóch zmiennych z i t , gdzie z określa położenie rozpatrywanego punktu, a t – chwilę rozpatrywaną. Funkcję dwóch zmiennych najczęściej przedstawia się graficznie jako zbiór wykresów, w których jedna zmienna jest osią odciętych, a druga – parametrem rodziny krzywych. W tym przypadku funkcję t dla stałego z nazywamy przebiegiem napięcia i prądu w punkcie o współrzędnej z . Natomiast funkcję z przy stałym t nazywamy chwilowym rozkładem napięcia i prądu wzdłuż linii lub obrazem fali w chwili t . W technice wysokich napięć najczęściej interesuje nas odpowiedź węzła na atak fali wędrownej. Węzłem nazywamy każdy punkt linii, w którym występuje skokowa zmiana impedancji falowej, np. punkt przejścia z linii napowietrznej do kablowej, rozgałęzienie linii lub też punkt, w którym dołączone są jakiekolwiek stałe skupione RLC. Odpowiedzią węzła nazywamy przebieg napięcia węzła względem ziemi, wymuszony przez



atakującą go falę, który to przebieg może być zarejestrowany za pomocą oscyloskopu włączonego między węzeł a ziemię.

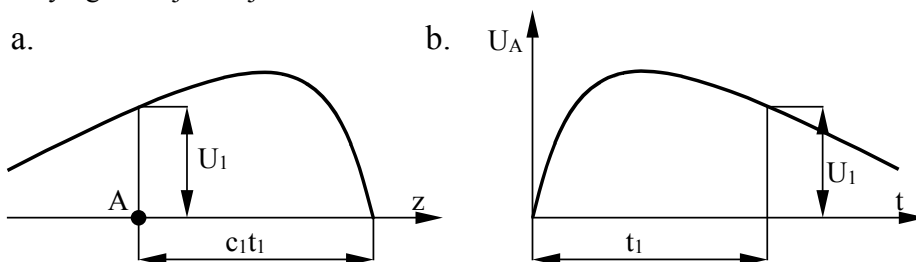
1.2. Określenie kształtu fal za pomocą oscyloskopu

Założmy, że po linii o impedancji falowej Z_1 i prędkości ruchu falowego c_1 (rys. 6.1) porusza się fala napięciowa o dowolnym kształcie, lecz o wartości szczytowej niewielkiej, umożliwiającą dołączenie oscyloskopu do linii w dowolnym punkcie, np. A.



Rys. 6.1. Obraz fali napięciowej

Jeżeli układ czasowy oscyloskopu uruchomimy przed dojściem fali do punktu A i dobierzemy odpowiednio prędkość zapisu, na ekranie oscyloskopu ujrzymy odwrócony obraz fali (rys. 6.2b). Istotnie, jeśli jako początek rachuby czasu przyjąć chwilę dojścia początku fali do punktu A, to po chwili t_1 napięcie fali w punkcie A będzie odpowiadać odciętej $c_1 \cdot t_1$ (rys. 6.2a), natomiast to samo napięcie zarejestruje oscyloskop w chwili t_1 . Na rys. 6.2 przedstawiony jest obraz i oscylogram tej samej fali.



Rys. 6.2. Obraz przebiegu zmian napięcia w czasie fali napięciowej: a) obraz fali w chwili t_1 , b) przebieg napięcia w punkcie A (rys. 6.1).

Z powyższych krótkich rozważań wynika, iż przebiegi falowe można z powodzeniem badać posługując się oscyloskopem.

1.3. Przejście fali prostokątnej z linii o impedancji falowej Z_1 na linię o impedancji falowej Z_2

Przy dojściu fali napięciowej U_0 do węzła, w którym występuje skokowa zmiana impedancji falowych linii, powstają dwie nowe fale: fala przepuszczona U_2 na linię o impedancji falowej Z_2 oraz fala odbita U_1 poruszająca się w kierunku przeciwnym do kierunku fali padającej. Wartość napięcia fali przepuszczonej i odbitej wyznacza się z następujących wzorów:

$$U_2 = U_0 \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = \alpha U_0$$

$$U_1 = U_0 \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = \beta U_0$$

W punkcie węzłowym występują zależności:

$$U_0 + U_1 = U_2 ; \quad I_0 + I_1 = I_2$$

Z czego wynika, że:

$$1 + \beta = \alpha$$

gdzie: α - współczynnik przepuszczania fali,
 β - współczynnik odbicia fali,

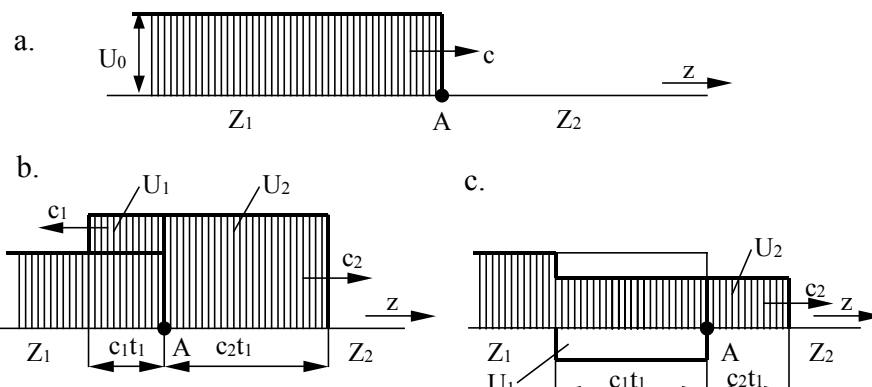
$$\alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad \beta = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

W oparciu o te podstawowe zależności możemy konstruować obrazy fal wzdłuż linii w dowolnej chwili czasowej t .

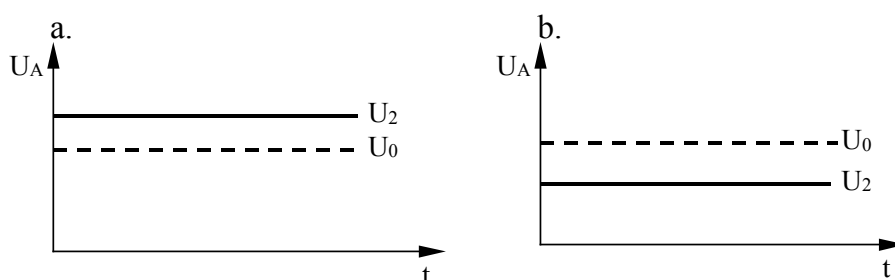
Dla przykładu na rys. 6.3. przedstawiono obraz fali atakującej węzeł A, przy czym rys. 6.3a przedstawia obraz fali w momencie, gdy czoło fali dochodzi do punktu A (moment ten przyjęto jako $t = 0$), rys. 6.3b – obraz fali po czasie t_1 , w przypadku, gdy $Z_1 < Z_2$ (np. przy przejściu fali z kabla na linię napowietrzną), $c_1 = 0,5 c_2$, a rys. 6.3.c – obraz fali w przypadku, gdy $Z_1 > Z_2$, a $c_1 = 2 c_2$.

W zależności od wartości Z_1 i Z_2 współczynnik α może zmieniać się od 0 do 2, natomiast β od -1 do $+1$. Pierwsze z tych wartości odpowiadają przypadkowi zwarcia końca linii, po której biegnie fala, tj. przypadkowi $Z_2 = 0$, drugie – przypadkowi rozwarcia końca tej linii, tj. $Z_2 = \infty$. W przypadku, gdy $Z_1 = Z_2$, to $\alpha = 1$, $\beta = 0$. Jest to bardzo ważny przypadek;





Rys. 6.3. Przejście fali prostokątnej z linii o impedancji falowej Z_1 na linię o impedancji Z_2 : a) fala atakująca, b) fal po czasie t_1 przy $Z_1 < Z_2$, c) obraz fal po czasie t_1 przy $Z_1 > Z_2$.



Rys. 6.4. Przebieg zmian napięcia w czasie w punkcie węzłowym linii: a) $Z_1 < Z_2$, b) $Z_2 < Z_1$

pozwala w sposób eksperymentalny wyznaczyć impedancję falową linii długiej. Jeżeli zastąpić impedancję falową Z_2 przez bezindukcyjną rezystancję R , to w przypadku spełnienia warunku $Z_1 = R$, nie otrzymamy fali odbitej, a fala przepuszczona będzie równa fali padającej.

Spróbujmy teraz dla tych samych dwóch przypadków przedstawionych na rys. 6.3 skonstruować oscylogramy, oczywiście przyjmując nadal, że czas $t = 0$ obieramy w chwili dojścia fali atakującej U_0 do węzła A. Jeśli oscyloskop dołączymy do linii w punkcie A, w obydwu przypadkach na ekranie oscyloskopu zaobserwujemy $U_A = f(t)$ (rys. 6.4).

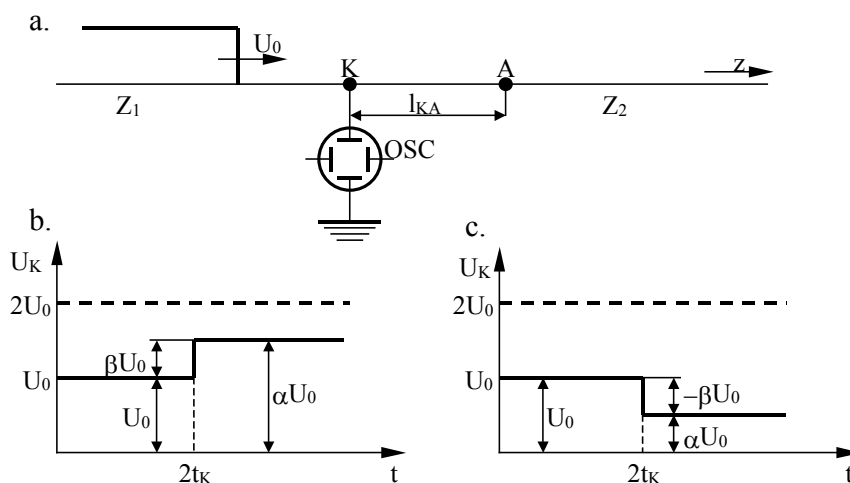
Dołączymy teraz oscyloskop w punkcie K leżącym z lewej strony punktu A w odległości l_{KA} (rys. 6.5.a). W przypadku, gdy $Z_2 > Z_1$, otrzymamy oscylogram

jak na rys. 6.5.b, w przypadku zaś $Z_2 < Z_1$ – jak na rys. 6.5.c. Czas $t_K = \frac{l_{KA}}{c_1}$.

Z tych oscylogramów można już odczytać wartości szczytowe fali atakującej i odbitej oraz wiedząc, że

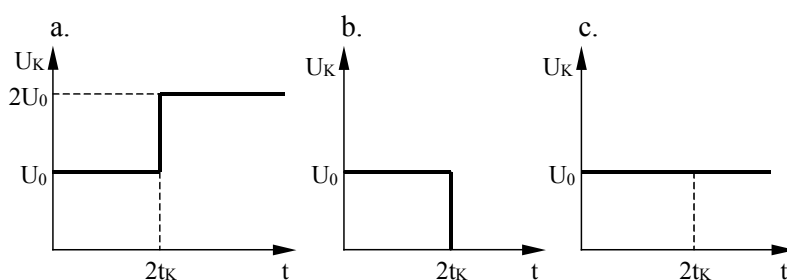
$$U_2 = U_0 + U_1$$

również i wartość szczytową fali przepuszczonej.



Rys. 6.5. Obraz fali przed dojściem do punktu węzłowego: a) przebieg zmian napięcia w czasie w punkcie K, b) $Z_2 > Z_1$, c) $Z_2 < Z_1$

Przebieg napięcia w punkcie K w przypadkach szczególnych pokazany jest na rys. 6.6.



Rys. 6.6. Przebiegi zmian napięć w czasie w punkcie K dla: a) końca otwartego, b) końca zwartego, c) przy $Z_1 = Z_2$

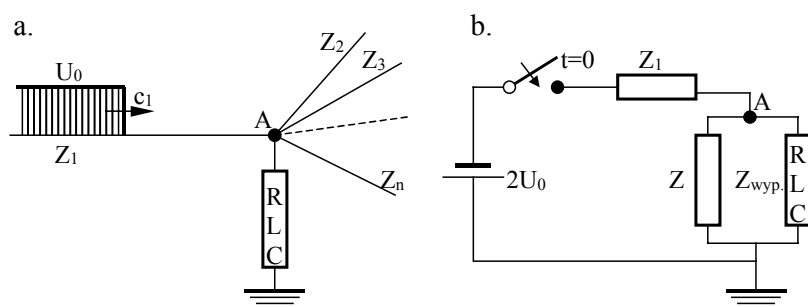
Zjawisko odbicia fali od końca zwartego jest wykorzystywane do lokalizacji miejsca uszkodzenia kabla. Uszkodzenie izolacji dla fal o dostatecznie dużej

wartości szczytowej, powoduje przebicie w miejscu uszkodzenia, jest prawie równoznaczne ze zwarciem go w tym miejscu. Porównując czas przebiegu fali tam i z powrotem (t_1) do miejsca uszkodzenia z czasem przebiegu fali na całym kablu, (t_2), którego długość (l) jest znana, możemy zlokalizować położenie miejsca uszkodzenia jako

$$l_1 = l \frac{t_1}{t_2}$$

1.4. Odpowiedź węzła obciążonego stałymi skupionymi i zaatakowanego przez falę prostokątną

Rozpatrzmy teraz przypadek ogólny, gdy punkt A jest nie tylko punktem rozgałęzienia linii o różnych impedancjach falowych, lecz ponadto obciążony jest dowolną kombinacją stałych skupionych R, L, C (rys. 6.7.a).



Rys. 6.7. Trafienie fali na węzeł obciążony stałymi skupionymi: a) węzeł linii obciążonej stałymi skupionymi, b) schemat zastępczy Petersena.

Wiadomo (z kursu wykładów ogólnych), że odpowiedź węzła w przypadku zaatakowania go falą napięciową najwygodniej jest wyznaczyć w oparciu o schemat zastępczy, zwany schematem Petersena. Schemat taki dla układu z rys. 6.7.a podano na rys. 6.7.b przy czym: Z_1 oznacza impedancję falową linii, po której biegnie fala, Z – wypadkową impedancję falową linii $Z_2 \dots Z_n$, zaś Z_{wyp} – wypadkową impedancję stałych skupionych R, L, C.

Posługując się rachunkiem operatorowym można wyznaczyć przebieg napięcia w punkcie A (względem ziemi) w postaci operatorowej:

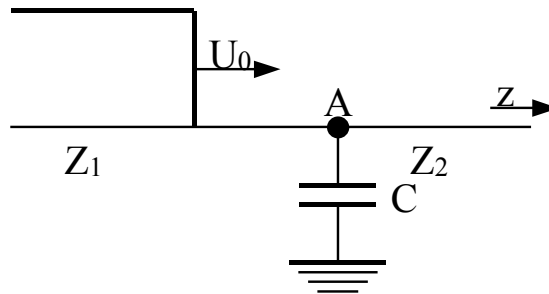
$$U_A(s) = \frac{2U_0}{s} \cdot \frac{Z(s)}{Z_1 + Z(s)}$$

gdzie $Z(s)$ jest wypadkową impedancją w postaci operatorowej, obciążającą węzeł A. Stosując przekształcenia odwrotne wyznacza się $U_A(t)$, czyli odpowiedź węzła.

Rozpatrzony przypadek jest bardzo ogólny. Poniżej rozpatrzone zostaną proste przypadki obciążenia węzła.

1.5. Trafienie fali prostokątnej na pojemność skupioną włączoną między przewód a ziemię

Rozpatrywany przypadek jest stosunkowo prosty, ale jednocześnie bardzo ważny w technice wysokich napięć. Fala prostokątna przesuując się po linii o impedancji Z_1 trafia na węzeł A, w który następuje skokowe przejście na linię o impedancji Z_2 ; między węzeł A a ziemię włączona jest pojemność C (rys. 6.8). Rysunek 6.9.a przedstawia schemat zastępczy Petersena, a rys. 6.9.b – odpowiadający mu schemat operatorowy.



Rys. 6.8. Węzeł linii obciążony pojemnością

Impedancja obciążająca węzeł:

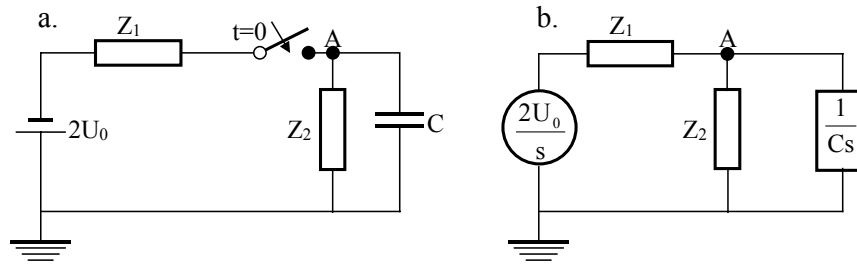
$$Z(s) = \frac{Z_2 \frac{1}{C_s}}{Z_2 + \frac{1}{C_s}} = \frac{Z_2}{Z_2 C_s + 1}$$

$$U_A(s) = \frac{2U_0 \frac{Z_2}{Z_1 C_s + 1}}{\frac{Z_2}{Z_2 C_s + 1}} = 2U_0 \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \frac{1}{s \left(\frac{1}{T} + s \right)} = \alpha U_0 \frac{1}{s \left(\frac{1}{T} + s \right)}$$

przy czym:



$$\alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad T = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} C.$$



Rys. 6.9. Schemat zastępczy Petersena (a) przypadku z rys. 6.8 oraz odpowiadający mu schemat operatorowy (b)

Otrzymaną funkcję operatorową możemy znaleźć we wszystkich tablicach operatorowych. Odpowiada jej funkcja czasu $1 - e^{-\frac{t}{T}}$. Zatem odpowiedź węzła będzie:

$$U_A(t) = \alpha U_0 (1 - e^{-\frac{t}{T}}),$$

$$\alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad T = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} C.$$

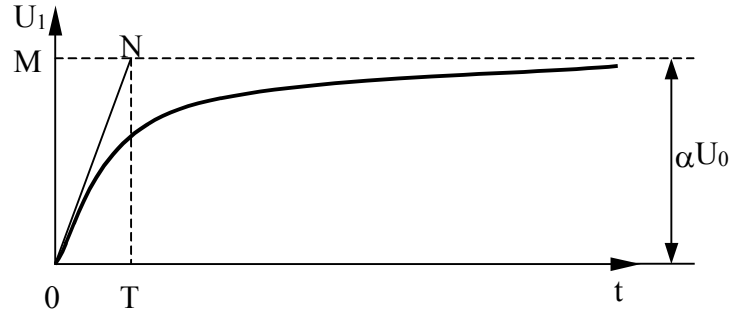
Wykresem odpowiedzi jest, więc funkcja, której asymptotą jest linia prosta $U_A = \alpha U_0$. Parametr T jest stałą czasu tej funkcji i równy jest jej podstycznej. Zatem najłatwiejszy sposób narysowania tej funkcji (rys. 6.10.) polega na odmierzeniu na asymptocie odcinka NM równego T , połączeniu punktów O i N prostą oraz naszkicowaniu krzywej stycznej w punkcie O do ON i zbliżającej się asymptotycznie do prostej MN .

Jak widać, po czasie dostatecznie długim napięcie węzła osiąga wartość ustaloną $U_A = \alpha U_0$, taką samą, jak gdyby pojemności C wcale nie było. Praktycznie biorąc, po czasie $t = 3 T$

$$U_2 \cong 0,95 \alpha U_0.$$

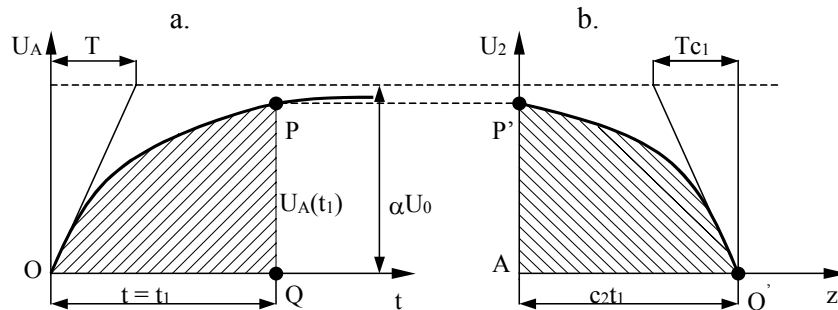
Natomiast w pierwszej chwili po nadejściu fali prostokątnej punkt A zachowuje się tak, jak gdyby był zwarty z ziemią (napięcie tego punktu względem ziemi jest równe zero).





Rys. 6.10. Odpowiedź węzła obciążonego pojemnością

Znając odpowiedź węzła można bez trudności narysować obraz fali przepuszczonej dla dowolnej chwili t , np. dla $t = t_1$ (rys. 6.11). W tym celu na wykresie $U_2 = f(z)$ odcinamy na osi rzędnych wartość $U_A(t_1)$, tj. napięcie węzła w chwili t_1 . Punkt węzłowy A jest tu, bowiem przyjęty jako początek układu współrzędnych, dla którego $z = 0$.

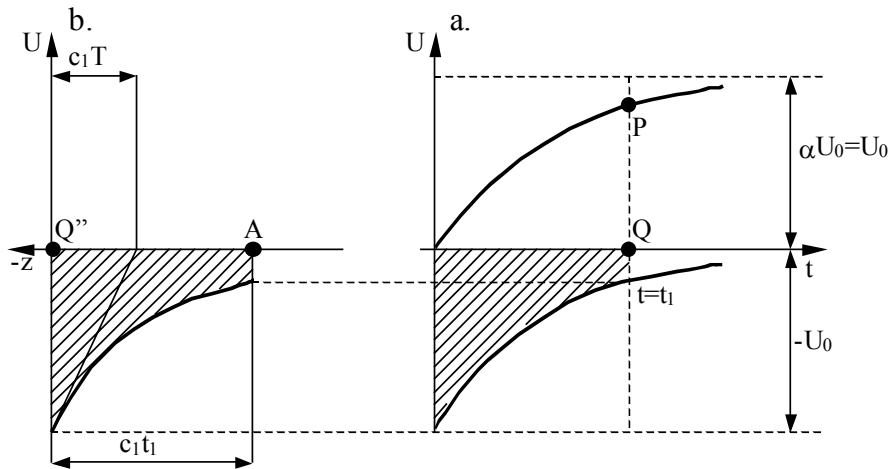
Rys. 6.11. Wyznaczanie obrazu fali przepuszczonej (b) dla danej chwili t_1 na podstawie znajomości odpowiedzi węzła (a)

Skala na osi z powinna być tak dobrana, żeby jednostka długości była równa jednostce czasu pomnożonej przez prędkość ruchu falowego c_2 na linii odchodzącej Z_2 . Wówczas obraz fali $P'O'$ będzie po prostu zwierciadlanym odbiciem części oscylogramu węzła zawartej między punktami O i P.

Znacznie trudniejsze jest naszkicowanie fali odbitej U_1 . Posługujemy się tu zależnością $U_0 + U_1 = U_A$, czyli $U_1 = U_A - U_0$, zatem rzędne obrazu fali odbitej są równe różnicy rzędnych fali przepuszczonej i fali nadchodzącej. Rysunek 6.12.a wyjaśnia konstrukcję opartą na tej zasadzie (założono, że $Z_1 = Z_2$).

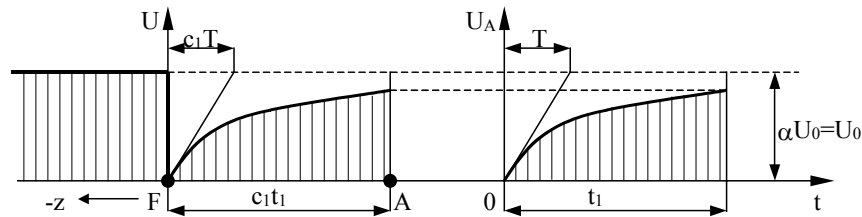
Możemy również narysować obraz fali odbitej w funkcji odległości od punktu A dla chwili $t = t_1$ (rys. 6.12.b). Skala na osi z obrana jest w ten sposób, aby

jednostka długości odpowiadała jednostce czasu pomnożonej przez prędkość ruchu falowego c_1 na linii Z_1 . Na osi odciętych odkładamy punkt Q'' tak, aby odcinek $Q''A$ był równy odcinkowi OQ .



Rys. 6.12 Wyznaczenie obrazu fali odbitej (b) dla danej chwili t_1 na podstawie znajomości odpowiedzi węzła (a) i fali padającej

Gdyby punkt A nie był węzłem, a zwykłym punktem linii Z_1 , wtedy fala nadchodząca wymuszałaby w nim w czasie od 0 do t_1 stałe napięcie $U_A = U_0$. Napięcie to musimy odjąć od rzeczywistego napięcia węzła U_A fali odbitej. Figura zakreskowana na rys. 6.12.b będzie identyczną z obrazem fali odbitej ważnym dla chwili t_1 .



Rys. 6.13. Wyznaczanie obrazu wypadkowego fali dla danej chwili t_1 na podstawie znajomości odpowiedzi węzła

Ostatnim zadaniem jest narysowanie obrazu wypadkowego na liniach Z_1 i Z_2 . Obraz wypadkowy na linii Z_2 nie różni się od obrazu fali przepuszczonej, natomiast rzędne obrazu wypadkowego na linii Z_1 (rys. 6.13) będą oczywiście sumą rzędnych fali odbitej i atakującej. Zatem dla chwili t_1 na odcinku o długości $c_1 t_1$, na lewo od punktu A , obraz fali jest identyczny z wykresem odpowiedzi węzła,

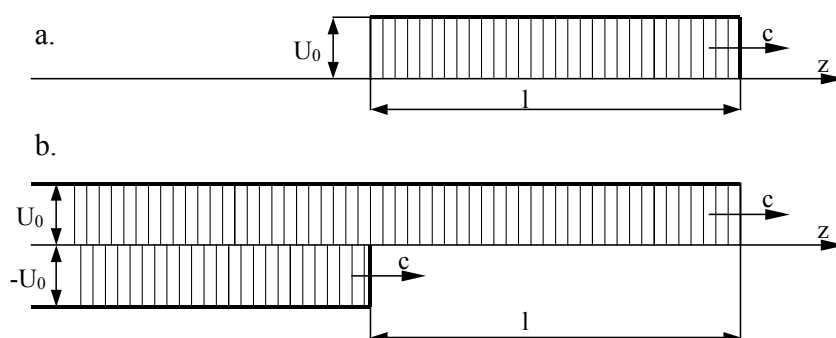
natomiast na lewo od punktu F obraz fali wypadkowej będzie identyczny z obrazem fali atakującej, gdyż fala odbita jeszcze tam nie doszła.

Z powyższego przykładu widać, iż w przypadku fali prostokątnej o nieskończonej długości pojemność zmniejsza stromość fali przepuszczonej, jednakże nie obniża jej wartości szczytowej.

1.6. Przebiegi falowe wywołane falami prostokątnymi o stosunkowo małej długości

W dotychczasowych rozważaniach zakładaliśmy, że fala nadchodząca była nieskończenie długa. Przyjmijmy teraz, że fala ma skończoną długość l . Falę taką można zastąpić dwoma falami o długościach nieskończenie długich i wartościach szczytowych $+U_0$ i $-U_0$, przesuniętymi względem siebie o odległość równą długości l fali samotnej (rys. 6.1).

Dzięki temu w dalszych rozważaniach można będzie wykorzystać wnioski z poprzednich rozdziałów. Jeśli krótka fala prostokątna trafia na pojemność skupioną równoległą lub indukcyjność skupioną szeregową i jeśli jej czas przebiegu porównywalny ze stałą czasu przebiegów przejściowych, to wówczas otrzymujemy nie tylko złagodzenie czoła fali, ale również obniżenie amplitudy fali przepuszczonej. Dlatego też kondensatory włączone między przewód a ziemię są stosowane do zmniejszania przepięć na stacji przy dochodzących do niej falach wędrownych z linii. Działanie ochronne tak włączonego kondensatora tłumaczy rys. 6.15.

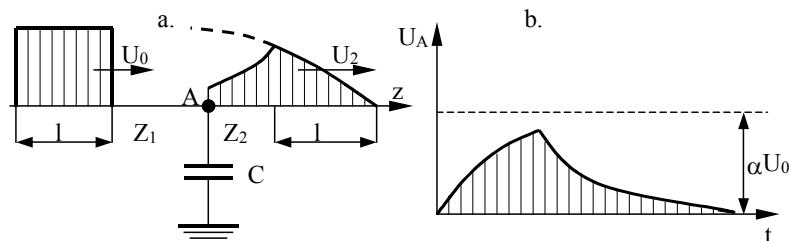


Rys. 6.14. Rozpatrywanie fali samotnej (a) jako wypadkowej fal zasilanych (b)

Kondensatory są obok odgromników ważnymi przyrządami w technice ochrony odgromowej. Ich podstawową cechą jest, jak widać, zmniejszenie stromości czoła fali. Jest to szczególnie ważne przy ochronie izolacji uzwojeń maszyn wirujących. Ponadto w przypadku fal krótkich kondensatory obniżają

wartość szczytową, przy czym obniżanie to jest tym skuteczniejsze, im fala jest krótsza. W praktyce przyjmuje się, iż kondensator nie obniża amplitudy, jeśli czas do półszczytu jest trzykrotnie większy niż stała czasowa

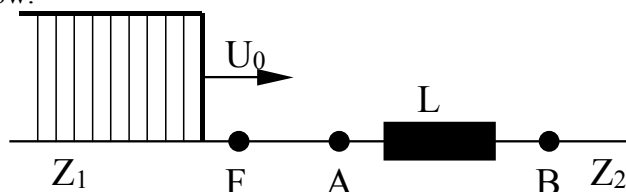
$$T = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot C.$$



Rys. 6.15. Obniżanie amplitudy fal samotnych przez kondensator włączony między przewód a ziemię: a) obraz fali, b) odpowiedź węzła

1.7. Przejście fali przez dławik włączony szeregowo do linii

Przypadek ten nabrał dość dużego znaczenia praktycznego. Jednym z zastosowań może być użycie dławików do ograniczenia prądu wyładowczego odgromników.



Rys. 6.16. Trafienie fali na dławik szeregowy

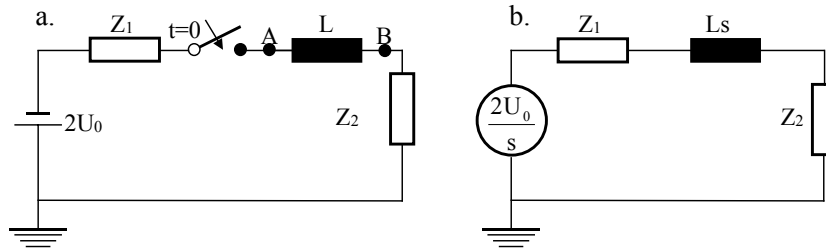
Rysunek 6.16. przedstawia schemat dla omawianego przypadku, rys. 6.17.a – obwód zastępczy, Petersena, a rys. 6.17.b – schemat operatorowy.

Ze schematu operatorowego, stosując prawo Kirchhoffa, otrzymujemy:

$$U_B(s) = \frac{2U_0}{s} \cdot \frac{Z_2}{L_s + Z_1 + Z_2} = 2U_0 \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \frac{\frac{1}{T}}{s\left(\frac{1}{T} + s\right)} = \alpha U_0 \frac{\frac{1}{T}}{s\left(\frac{1}{T} + s\right)};$$

gdzie:

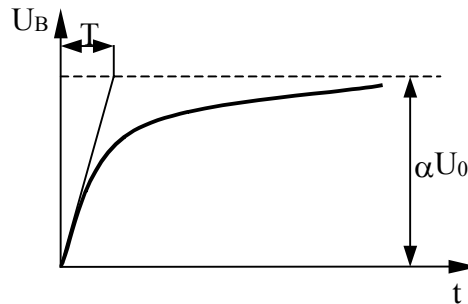
$$\alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad T = \frac{L}{Z_1 + Z_2},$$



Rys. 6.17. Schemat Petersena (a) oraz schemat operatorowy (b) dla przypadku pokazanego na rys. 6.16.

zastępując transformatory odpowiednimi oryginałami otrzymujemy wzór na napięcie w punkcie B.

$$U_B(t) = \alpha U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$



Rys. 6.18. Przebieg napięcia w czasie w punkcie B za dławikiem (punkt B – rys. 6.16.)

Rozwiązanie to w postaci graficznej przedstawione jest na rys. 6.18. Jak widać, napięcie w punkcie B, tj. za dławikiem, wzrasta wykładniczo do wartości ustalonej αU_0 (takiej samej, jak gdyby dławika nie było, a linie Z_1 i Z_2 stykały się bezpośrednio).

Z punktu widzenia napięcia występującego w punkcie B, a więc za dławikiem – dławik szeregowy w ten sam sposób oddziałuje na fale wędrowne, jak pojemność równoległa, jeśli stałe czasu T są w obu przypadkach jednakowe. Dławik szeregowy może, więc być, podobnie jak kondensator równoległy, sto-

sowany jako środek ochrony odgromowej. Łagodzi on stromość czoła fali. W tym przypadku obraz fali przepuszczonej jest taki sam, jak na rys. 6.11a.

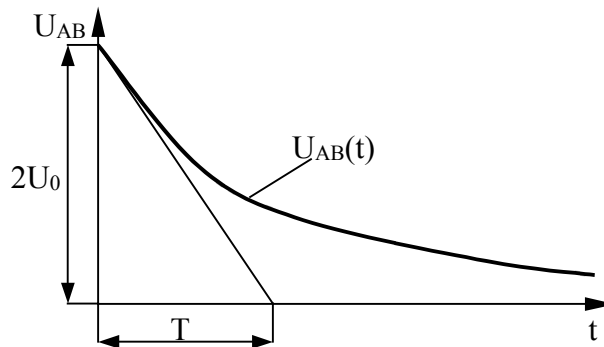
Obliczmy teraz, jakie napięcie powstaje na samym dławiku tj. między punktami A i B w przypadku fali zasilanej:

$$U_L(s) = \frac{2U_0}{s} \cdot \frac{Ls}{Ls + Z_1 + Z_2} = \frac{2U_0}{s} \cdot \frac{s}{s + \frac{Z_1 + Z_2}{L}} = \frac{2U_0}{s} \cdot \frac{s}{s + \frac{1}{T}}$$

Funkcją czasu dla operatora $\frac{1}{s + \frac{1}{T}}$ jest $e^{-\frac{t}{T}}$, zatem

$$U_{AB}(t) = 2U_0 e^{-\frac{t}{T}}$$

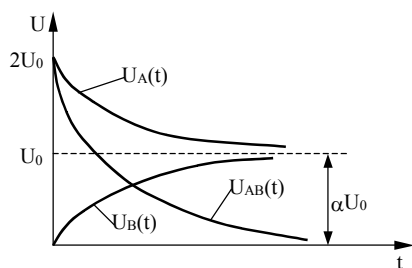
Wykres przebiegu napięcia w dławiku przedstawiony jest na rys. 6.19.



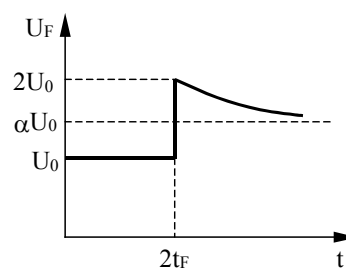
Rys. 6.19. Przebiegi napięcia w czasie na dławiku (punkty AB – rys. 6.16)

Jak widać, w pierwszej chwili po nadejściu fali do punktu A między zaciskami A i B dławika występuje podwójne napięcie fali, tj. $2U_0$. Stwarza to bardzo ostre wymagania dla izolacji dławika. Powinny one posiadać dostatecznie dużą indukcyjność i dostatecznie pewną izolację. W dławikach szeregowych występują ponadto ogromne siły dynamiczne przy przepływie prądu zwarcowego sieci, co jeszcze bardziej utrudnia ich konstrukcję.

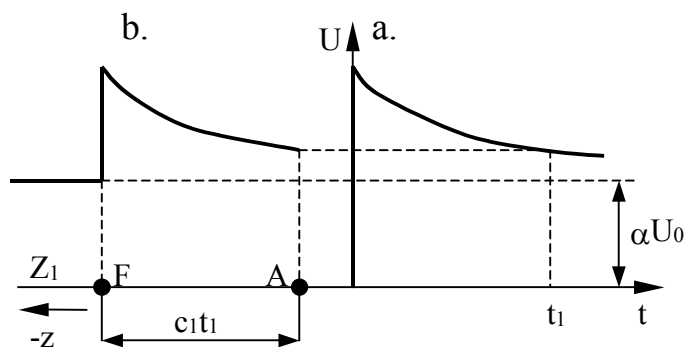
Ostatnim problemem jest kształt fali odbitej od punktu A. Kształt tej fali wyznaczyć możemy odejmując od wykresu napięcia w punkcie A napięcie fali atakującej. Z kolei napięcie w punkcie A będzie sumą napięcia w punkcie B i napięcia między zaciskami dławika, tj. wykresów z rys. 6.18. i 6.19. W wyniku otrzymujemy obraz przedstawiony na rys. 6.20.



Rys. 6.20. Przebiegi napięcia w czasie przed dławikiem (punkt A – rys. 6.16)



Rys. 6.21. Przebiegi napięcia w czasie w dowolnie wybranym punkcie przed dławikiem (punkt F – rys. 6.15)



Rys. 6.22. Odpowiedź węzła A (rys. 6.16) (a) i obraz fali dla chwili t_1 (b)

Z przeprowadzonych rozważań wynika, że fala odbita ma strome czoło i wysoką wartość szczytową. Dławik chroni, więc tylko izolację znajdującą się za nim, natomiast pogarsza warunki izolacji znajdującą się przed dławikiem (od strony fali atakującej). Na rysunku 6.21. pokazano oscylogram napięcia w punkcie F. Natomiast rys. 6.22. przedstawia konstrukcję obrazu fali wypadkowej w lewo od punktu A dla chwili $t = t_1$

1.8. Trafienie fali na obwód drgający LC

Przypadek taki przedstawiony jest na rys. 6.23. wraz ze schematem zastępczym. Fala dochodząca do obwodu LC powoduje pobudzenie go do drgań. W ogólnym przypadku drgania te są zawsze tłumione, przy czym tłumienie to jest

tym większe, im stosunek $\frac{R+Z}{L/C}$ jest większy. Dla obwodu podanego na rys.

6.23.b można napisać:

$$2U_0 = i(Z+R) + L \frac{di}{dt} + U_c.$$

Uwzględniając zależności $i = C \frac{dU_c}{dt}$ otrzymuje się:

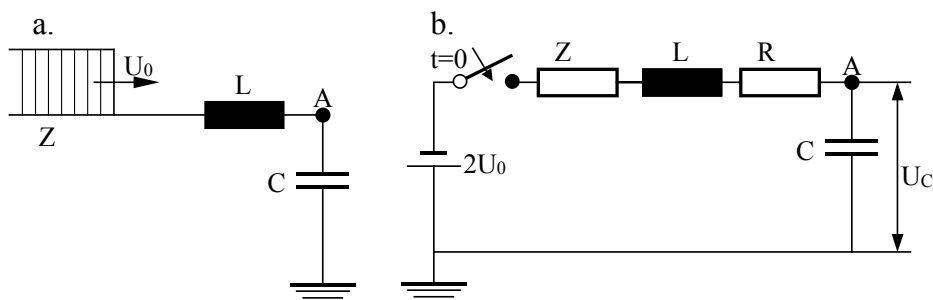
$$LC \frac{d^2 U_c}{dt^2} + (Z+R)C \frac{dU_c}{dt} + U_c = 2U_0.$$

Oznaczając przez:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC} \quad \delta = \frac{Z+R}{2L} \quad \Omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \quad \sigma = \arctg \frac{\Omega}{\delta}$$

można napisać wyrażenie na przebieg napięcia na kondensatorze C:

$$U_c = 2U_0 \left[1 - e^{-\delta t} \frac{\sin(\Omega t + \sigma)}{\sin \sigma} \right]$$



Rys. 6.23. Trafienie fali na obwód drgający (a) oraz schemat zastępczy Petersena (b) dla tego przypadku

Z wyrażenia tego wynika, że napięcie na kondensatorze ma charakter drgań tłumionych (rys. 6.24), przy czym ekstrema (maksyma) występują dla czasów:

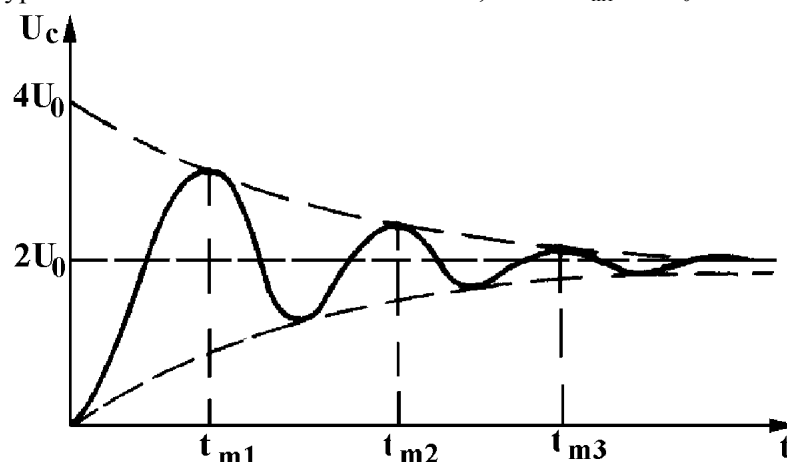
$$t_m = \frac{\pi}{\Omega} (2k-1), \text{ gdzie } k = 1, 2, 3, \dots, n.$$

Maksymalna wartość napięcia w pierwszym ekstremum wynosi:



$$U_{m1} = 2U_0 \left(1 + e^{-\frac{\pi\delta}{\Omega}} \right).$$

W przypadku braku tłumienia $\delta = 0$ i $e^{-\frac{\pi\delta}{\Omega}} = 1$, zatem $U_{m1} = 4U_0$.



Rys. 6.24. Odpowiedź węzła obciążonego obwodem drgającego

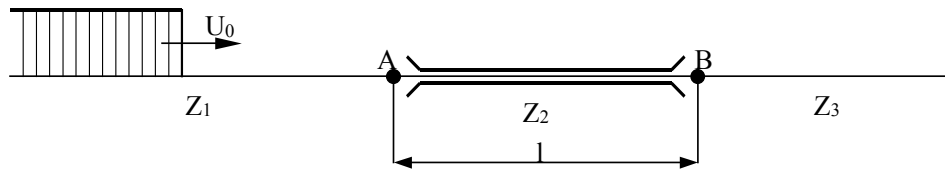
Po wytłumieniu drgań na kondensatorze ustala się napięcie $2U_0$ jak dla linii z krańcem otwartym.

W praktyce z przypadkiem takim można się spotkać przy ochronie stacji transformatorowej za pomocą dławików. Zwykle jednak nie ma tak dużych wzrostów napięcia, bowiem w spotykanych w praktyce przypadkach wielkość $\frac{L}{C}$ jest o wiele mniejsza niż $Z + R$.

1.9. Eliminacja impedancji falowej

Fala przechodząca przez krótki w porównaniu z jej długością odcinek linii będzie ulegać wielokrotnym odbiciom od obu krańców tej linii. Rozpatrzmy układ trzech szeregowo połączonych linii o różnych impedancjach falowych (rys. 6.25), przy czym linia o impedancji falowej Z_2 ma skończoną długość l . Po dojściu fali U_0 do punktu A, część z niej o wartości, $U_0 \alpha_{12}$ zostanie przepuszczona, a część odbita. Fala U_{12} dochodzi po czasie $\tau = \frac{1}{c_2}$ do punktu B powodując po-

wstanie nowej fali przepuszczonej $U_0 \alpha_{12} \alpha_{23}$ i odbitej $U_0 \alpha_{12} \beta_{23}$. Fala odbita wraca do punktu A itd.



Rys. 6.25. Eliminacja impedancji falowej

Bardzo pomocny przy badaniu zmian napięcia w punktach A i B jest podany przez Bowleya „rozkład jazdy” (rys. 6.26). Pozwala on w łatwy sposób określić poszczególne fale składowe na impedancjach Z_1 i Z_3 (A i B).

Sumując wartości napięć fal przepuszczonych na linię prawą otrzymuje się:

$$U_{\text{przep}} = U_B = U_0 \alpha_{12} \alpha_{23} [1 + \beta_{21} \beta_{23} + (\beta_{21} \beta_{23})^2 + \dots].$$

Jak widać, wyrażenie w nawiasie jest sumą postępu geometrycznego zbieżnego o ilorazie $(\beta_{21} \beta_{23}) < 1$. Stosując wzór na sumę takiego postępu dla $n = \infty$, otrzymujemy:

$$U_{\text{przep}} = U_0 \alpha_{12} \alpha_{23} \frac{1}{1 - \beta_{21} - \beta_{23}}$$

Uwzględniając wyrażenia na

$$\alpha_{12} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad \alpha_{23} = \frac{2Z_3}{Z_2 + Z_3}$$

$$\beta_{21} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad \beta_{23} = \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2}$$

otrzymuje się ostatecznie:

$$U_{\text{przep}} = U_0 \frac{2Z_3}{Z_1 + Z_3}$$

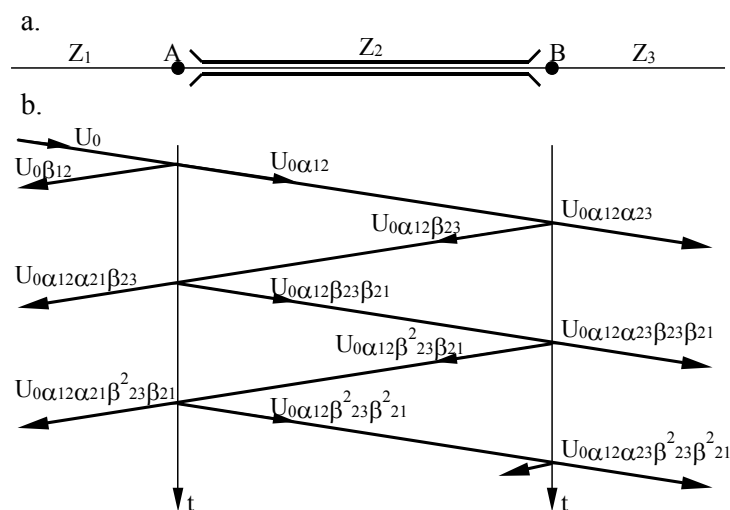
Widać stąd, że przy dostatecznie dużej liczbie odbić od krańców krótkiego odcinka linii wartość ustalona napięcia zależy tylko od impedancji falowych Z_1 i Z_3 . Nastąpiła, więc eliminacja wpływu odcinka linii Z_2 . Zjawisko to nazywamy eliminacją impedancji falowej. Można odróżnić 3 zasadnicze przypadki eliminacji:

$$Z_1 > Z_2 < Z_3,$$

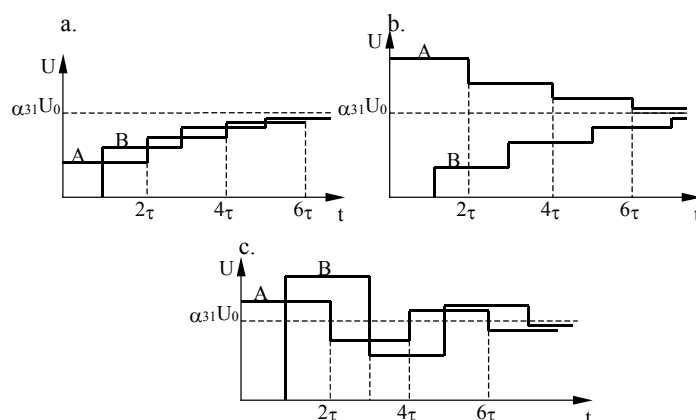
$$Z_1 < Z_2 > Z_3,$$

$$Z_1 < Z_2 < Z_3 \quad \text{lub} \quad Z_1 > Z_2 > Z_3.$$

Przebiegi zmian napięcia w punktach A i B podano na rys. 6.27.



Rys. 6.26. Badanie zmian napięcia przy eliminacji impedancji falowej (a) za pomocą rozkładu jazdy (b)

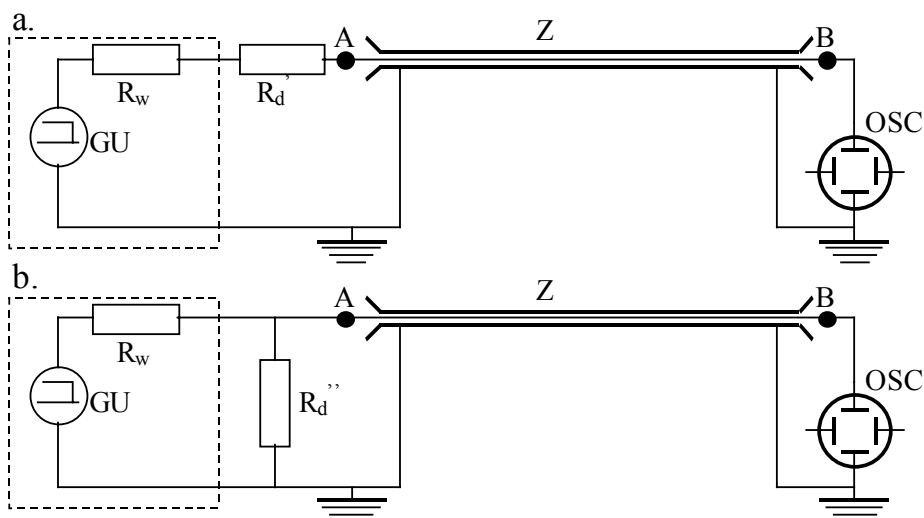


Rys. 6.27. Przebiegi zmian napięcia w poszczególnych punktach układu, gdzie występuje eliminacja impedancji falowej

- a) przy $Z_1 > Z_2 < Z_3$ w punktach A i B (rys. 6.25)
 b) przy $Z_1 < Z_2 > Z_3$ w punktach A i B (rys. 6.25), przy $Z_1 < Z_2 < Z_3$ w punktach A i B (rys. 6.25)

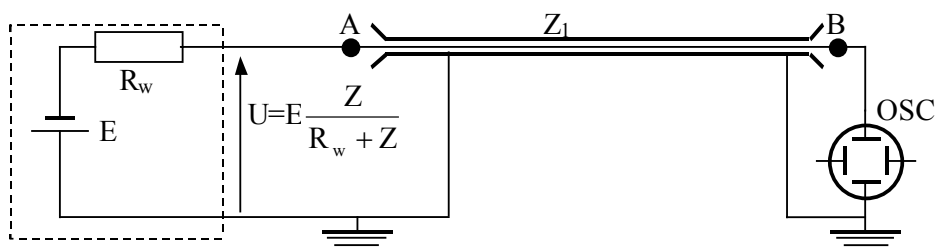


1.10. Dopasowanie rezystancji wyjściowej generatora do impedancji falowej kabla



Rys. 6.28. Sposoby dopasowania rezystancji wyjściowej generatora do impedancji linii

Często tam, gdzie występują zjawiska falowe zachodzi potrzeba „dopasowania” linii dłuższej na jednym lub obu jej końcach w celu uniknięcia zjawiska odbijania się fali od końca linii. Dopasowanie takie występuje wtedy, gdy rezystancja urządzenia dołączonego do linii, widziana od zacisków linii, jest równa jej impedancji falowej. Rozróżnia się dopasowanie linii od strony generatora impulsów oraz dopasowanie od strony obciążenia.

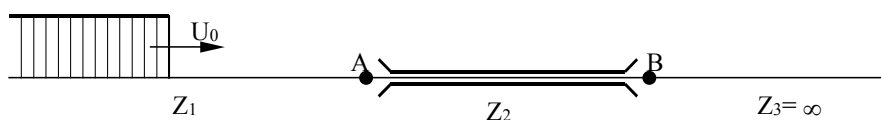


Rys. 6.29. Układ do analizy zjawisk występujących przy niedopasowaniu rezystancji generatora do impedancji kabla. E – zastępcza siła elektromotoryczna, R – rezystancja wewnętrzna generatora, Z_2 – impedancja kabla, OSC. – oscyloskop

Warunek dopasowania linii od strony generatora wymaga, aby jego rezystancja wyjściowa (tzw. rezystancja widziana od strony linii) była równa impedancji

falowej linii. W przypadku, gdy wymaganie to nie jest spełnione, należy do zacisków generatora dołączyć dodatkowy rezystor o odpowiedniej rezystancji. Jeśli rezystancja wyjściowa generatora R jest mniejsza od impedancji falowej linii Z , to wówczas należy w szereg z zaciskami generatora dołączyć rezystor dopasowujący R_d' spełniający warunek:

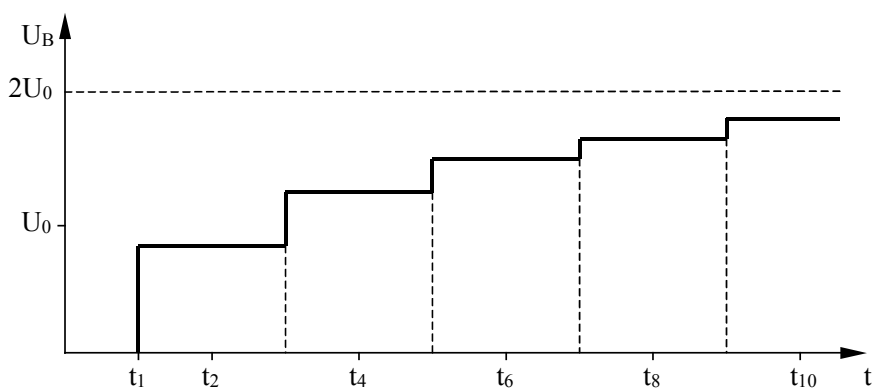
$$R_w + R_d' = Z.$$



Rys. 6.30. Zastąpienie układu z rys. 6.29 układem linii, gdzie może wystąpić eliminacja impedancji falowej

Natomiast, jeśli $R_w > Z$, należy zbocznikować wyjście generatora rezystorem R_d'' spełniającym warunek:

$$\frac{R_w R_d''}{R_w + R_d''} = Z.$$

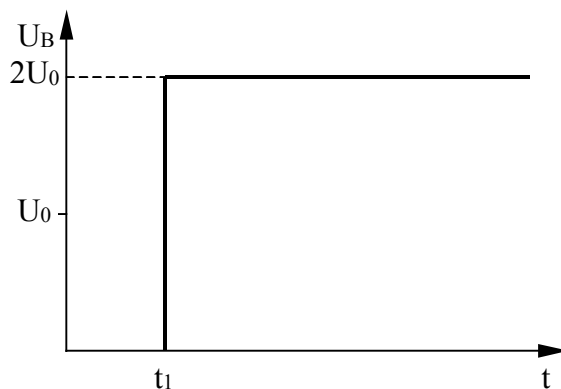


Rys. 6.31. Przebieg zmian napięcia w punkcie B (rys. 6.30)

Obydwa te przypadki przedstawione są na rys. 6.28.

Powstaje obecnie problem, w jaki sposób nie znając rezystancji wyjściowej generatora oraz impedancji falowej linii zrealizować to „dopasowanie”?





Rys. 6.32. Przebieg zmian napięcia w punkcie B (rys. 6.30) w przypadku gdy $R_w = Z_2$

Rozpatrzmy pewien schemat zastępczy układu: generator zasilający linię otwartą (rys. 6.29). Jak widać, generator został zastąpiony przez bezrezystancyjne źródło napięcia E oraz rezystancję R_w równą rezystancji wejściowej. Jak wynika z teorii przebiegów falowych, rezystancję R_w można traktować w pewnych przypadkach jako linię długą o impedancji falowej $Z_1 = R_w$. Koniec B jest otwarty, a więc mamy układ odcinków linii długich jak na rys. 6.30. Co zaobserwujemy w punkcie B w przypadku, kiedy z generatora otrzymamy udar prostokątny? Jeśli $Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3$, wystąpi zjawisko eliminacji impedancji falowej, które łatwo jest rozpatrzeć posługując się rozkładem jazdy (patrz p. 1.9). Rozpatrzmy przypadek, gdy $Z_1 > Z_2$ ($Z_3 = \infty$, co wynika z układu pomiarowego). W punkcie B zaobserwujemy przebieg pokazany na rys. 6.31 ($t=0$, gdy fala dochodzi do punktu A). Otrzymujemy, zatem charakterystyczne schodki świadczące o kilkakrotnym odbijaniu się fal. Łatwo wyciągnąć wniosek, że tylko w jednym przypadku otrzymamy falę prostokątną bez schodków, a mianowicie, gdy $R_w = Z_2$. W takim przypadku obraz na ekranie będzie taki, jak na rys. 6.32.



2. POMIARY

2.1. Dopasowanie rezystancji wyjściowej generatora do impedancji falowej kabla

Schemat połączeń

Dopasowanie przeprowadzić w układach z rys. 6.28.

Sposób wykonania pomiaru

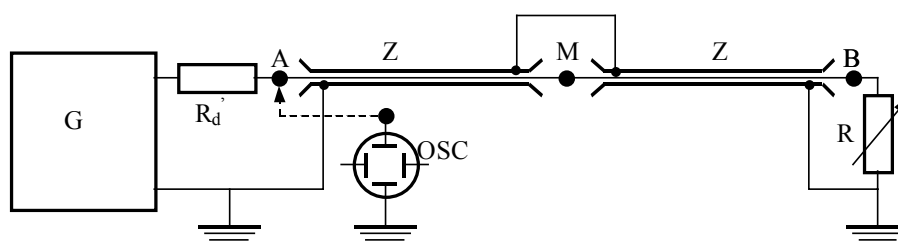
Dobierając odpowiednio rezystancję R_d' lub R_d'' należy uzyskać w punkcie B oscylogram jak na rys. 6.32. Przerysować oscylogramy w punkcie, B i A

Opracowanie pomiaru

Podać wartość rezystancji dodatkowej oraz uzasadnić, że oscylogramy w punktach A i B są prawidłowe.

2.2. Określenie impedancji linii długiej

Schemat połączeń



Rys. 6.33. Schemat układu pomiarowego do określenia impedancji falowej linii długiej.
 G – generator udarowy, R_d' – rezystor dopasowujący, OSC – oscyloskop, Z – kabel koncentryczny, R – rezystor dekadowy

Sposób wykonania pomiaru

Zmieniając wartość rezystora R , doprowadzamy do zaniku odbić od końca B kabla; stan taki (wejście generatora musi być dopasowane do impedancji falowej kabla) występuje wtedy, gdy $Z = R$. Wartość rezystancji zanotować.

Opracowanie wyników pomiaru

Z wymiarów geometrycznych i przenikalności elektrycznej izolacji kabla (polietylenu) określić jego impedancję falową i prędkość rozchodzenia się fali ($\epsilon' = 2,2$, stosunek promieni $R/r = 6,5$). Porównać z pomierzoną wartością impedancji falowej kabla.

2.3. Rejestracja zjawisk falowych w linii długiej przy przejściu fali z linii o impedancji falowej Z_1 na linię o impedancji falowej Z_2

Schemat połączeń

Schemat połączeń jak w p. 2.2, impedancja falowa $Z_1 = Z$ a Z_2 modelujemy przy pomocy rezystora R .

Sposób wykonania pomiaru

Dokonyamy pomiaru dla czterech przypadków:

1. Linia Z_1 zwarta w punkcie B.
2. Linia Z_1 rozwarta w punkcie B.
3. W punkcie B załączony jest rezystor $R < Z_1$.
4. W punkcie B załączony jest rezystor $R > Z_1$.

Wartości rezystancji poda prowadzący ćwiczenie. Dla każdego z tych przypadków zdjąć oscylogramy w punkcie A i B.

Opracowanie wyników pomiaru

Dla przypadków 3 i 4 wyznaczyć na podstawie oscylogramów współczynnik odbicia i przepuszczenia fali w węźle B, a następnie porównać je z obliczonymi wartościami α i β ze wzorów podanych w p. 1.3. Na podstawie oscylogramów w punkcie A dla przypadku 1 i 2 oraz obliczonej prędkości ruchu falowego w p.2.2. wyznaczyć długość kabla.



2.4. Eliminacja impedancji falowej

Schemat połączeń

Układ połączeń zgodnie z rys. 6.33.

Sposób wykonania pomiaru

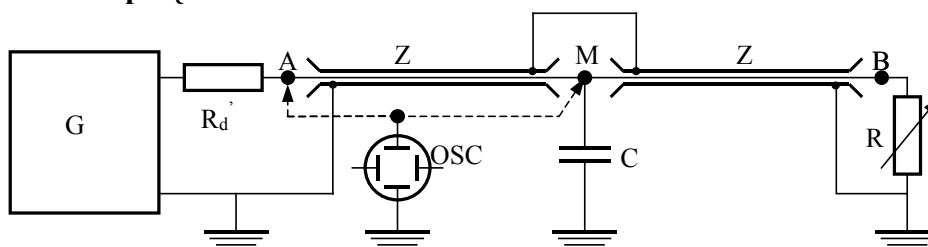
W ćwiczeniu należy rozpatrzyć przypadek $Z_1 > Z_2 < Z_3$, gdzie: Z_1 – rezystancja generatora wraz z rezystorem dodatkowym R_d , Z_2 – impedancja falowa kabla, Z_3 – rezystor dekadowy R .

Zdjąć oscylogramy w punktach A i B.

Uwaga: Wartość R_d oraz R poda prowadzący ćwiczenie.

2.5. Trafienie fali na pojemność skupioną

Schemat połączeń



Rys. 6.34. Schemat układu pomiarowego do obserwacji zjawisk przy trafieniu fali na węzeł obciążony pojemnością. C – pojemność, $R = Z$. Pozostałe oznaczenia jak na rys. 6.33.

Sposób wykonania pomiaru

Dokonać pomiarów dla dwóch przypadków.

1. Dla fali padającej o nieskończonej długości. Czas trwania fali padającej $t_F > 3T$ (T – stała czasowa przebiegu napięcia w funkcji czasu w węźle M). W tym przypadku zdjąć oscylogramy w punktach M i A oraz wyznaczyć wartość stałej czasowej T .
2. Dla fali samotnej o czasie trwania $t_F = T$ oraz $t_F = 2T$, zdjąć oscylogramy w punktach M i A oraz pomierzyć wartość szczytową fali

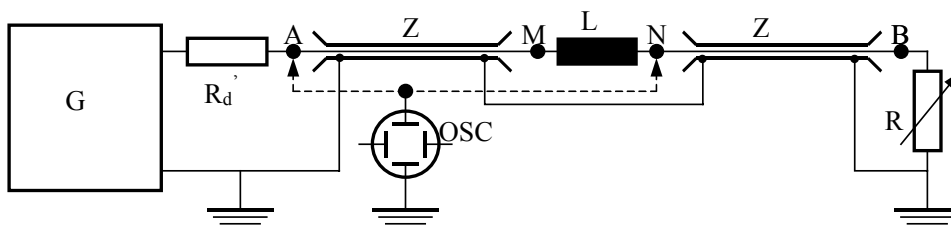
przepuszczonej. Czas trwania fali samotnej należy ustawiać przełącznikiem „WYPEŁNIENIE” generatora fali prostokątnej.

Opracowanie wyników pomiaru

Na podstawie pomierzonej stałej czasowej T oraz znajomości impedancji falowej linii wyznaczyć wartość pojemności w węźle i porównać ją z wartością rzeczywistą C . Dla przypadku fali samotnej podać procentowe obniżenie fali przepuszczonej w stosunku do fali padającej w zależności od jej czasu trwania t_F .

2.6. Trafienie fali na indukcyjność skupioną.

Schemat połączeń



Rys. 6.35. Schemat układu pomiarowego do obserwacji zjawisk przy trafieniu fali na dławik szeregowy. L – dławik. Pozostałe oznaczenia jak na rys.6.34.

Sposób wykonania pomiaru

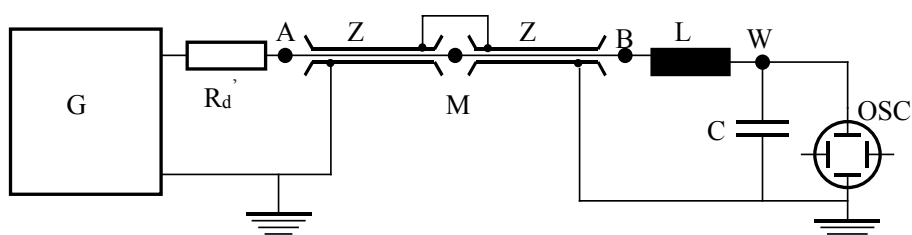
Należy zdjąć oscylogramy w punktach A, M i N.

Opracowanie wyników pomiaru

Na podstawie oscylogramów określić stałą czasową T . Następnie znając impedancję falową Z obliczyć indukcyjność L i porównać z jej rzeczywistą wartością.

2.7. Trafienie fali prostokątnej na obwód drgający LC

Schemat połączeń



Rys. 6.36. Schemat układu pomiarowego do obserwacji zjawisk przy trafieniu fali na obwód drgający. Oznaczenie jak na rys. 6.33, 6.34, 6.35.

Sposób wykonania pomiaru

Należy zdjąć oscylogramy w punkcie W oraz w punkcie A.

Opracowanie wyników pomiaru

Na podstawie oscylogramów określić w procentach przepięcie na podejściu (w punkcie W) w stosunku do wartości szczytowej fali atakującej.

3. UWAGI I WNIOSKI

ĆWICZENIE 7

WYZNACZANIE ROZKŁADU NAPIĘĆ W UZWOJENIU TRANSFORMATORA PRZY NAPIĘCIU UDAROWYM

1. WIADOMOŚCI OGÓLNE

1.1. Schemat zastępczy uzwojenia transformatora

Dla przebiegów udarowych schemat zastępczy uzwojeń transformatora różni się znacznie od schematu dla napięć wolnozmiennych (np. 50 Hz) i przedstawia sobą złożony układ połączeń: rezystancji wzdłużnych, rezystancji poprzecznych, indukcyjności własnych i wzajemnych, pojemności doziemnych i wzdłużnych. Zwykle jednak do analizy teoretycznej zjawisk zachodzących w uzwojeniach transformatora przy oddziaływaniu na nie fal wędrownych wystarcza uproszczony schemat zastępczy, w którym występują tylko pojemności doziemne C i wzdłużne K oraz indukcyjności własne poszczególnych cewek L odpowiednio zwiększone dla częściowego bodaj odwzorowania indukcyjności wzajemnych. Przy użyciu tego schematu (rys. 7.1) można dostatecznie dobrze odwzorować przebiegi udarowe w uzwojeniu transformatora.

1.2. Chwilowy rozkład napięcia. Oscylogram napięcia

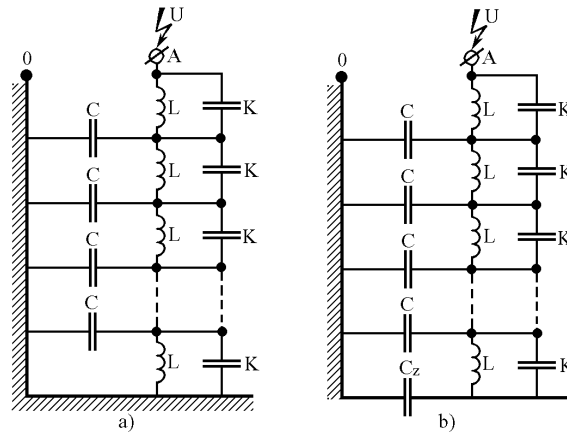
O ile przy zasilaniu transformatora napięciem przemiennym o małej częstotliwości rozkład napięcia wzdłuż uzwojenia jest praktycznie prostoliniowy i ustalony, to w przypadku przebiegów nieustalonych, występujących przy zaatakowaniu zacisku liniowego transformatora napięciem udarowym, można mówić tylko o chwilowym rozkładzie napięcia wzdłuż uzwojenia.



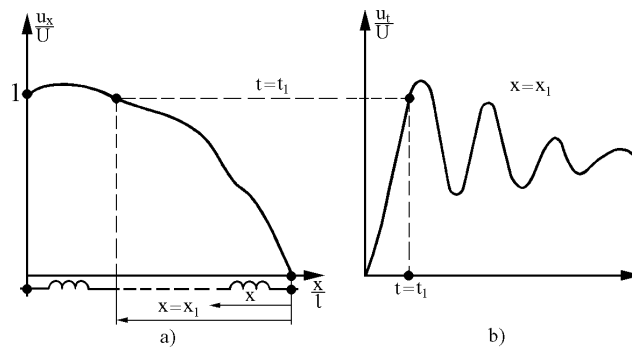
Stan nieustalony, na podstawie schematu zastępczego uzwojeń transformatora, może być opisany w ogólnym przypadku przy pomocy dość złożonych funkcji dwóch zmiennych niezależnych, z których jedną jest czas t , a drugą – odległość x między dowolnymi punktami uzwojenia a jego początkiem, mierzona wzdłuż uzwojenia. Przyjmując jedną ze zmiennych niezależnych za parametr, uzyskuje się równanie parametryczne, pozwalające na wyznaczenie rodziny rozwiązań w postaci charakterystyk, które można przedstawić graficznie na płaszczyźnie.

Jeżeli jako parametr przyjąć czas t , otrzymujemy w wyniku charakterystyki nazywane chwilowym rozkładem napięcia, natomiast dla parametru x uzyskuje się charakterystyki nazywane przebiegiem napięcia lub oscylogramem (rys. 7.2).

Przyjęcie dla przebiegu napięcia nazwy „oscylogram napięcia” wywodzi się stąd, że oscylograf włączony między punkty x a początek uzwojenia zarejestruje dokładnie taki sam przebieg napięcia, jak przedstawiony na rys. 7. 2b.



Rys. 7.1. Uproszczony schemat zastępczy uzwojenia transformatora: a) uzwojenie z końcem uziemionym, b) uzwojenie z końcem izolowanym

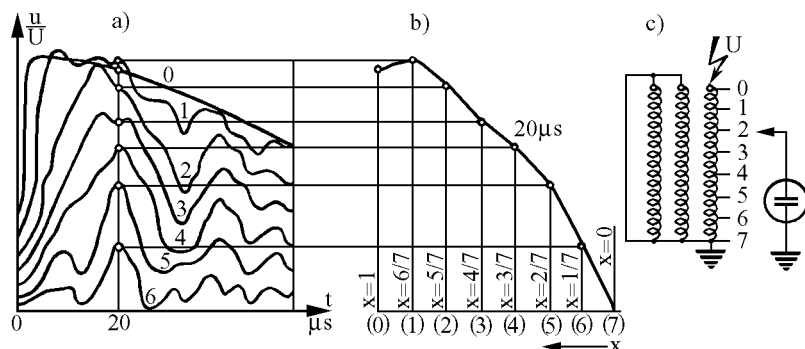


Rys. 7.2. Wykresy: a) chwilowy rozkład napięcia wzdłuż uzwojenia transformatora w chwili $t = t_1$, b) oscylogram napięcia w punkcie $x = x_1$.

u – napięcie między rozpatrywanym punktem x a początkiem uzwojenia, U – napięcie przyłożone do zacisku wejściowego transformatora, l – długość całego uzwojenia

1.3. Metoda wyznaczania chwilowego rozkładu napięcia. Obwiednia przebiegów

Konstruktor układu izolacyjnego transformatora interesuje przede wszystkim rozkład napięcia wzdłuż uzwojenia, a szczególnie rozkład maksymalnych wartości przebiegów, jakie mogą pojawić się w uzwojeniu po zaatakowaniu go udarem, czyli tzw. obwiednia przebiegów (pojęcie to będzie wyjaśnione nieco dalej). Rozkład chwilowy napięcia można wyznaczyć eksperymentalnie, rejestrując oscylogramy w poszczególnych punktach uzwojenia. Taki sposób wyznaczania chwilowego rozkładu napięcia ilustruje rys. 7.3.



Rys. 7.3. Eksperymentalny sposób wyznaczania rozkładów napięcia: a) oscylogramy przebiegów udarowych zarejestrowane w 7 punktach transformatora po doprowadzeniu udaru o kształcie zbliżonym do prostokątnego (0.5/200 μs , logarytmiczna skala czasu), b) rozkład napięcia po 20 μs od chwili doprowadzenia udaru, c) schemat uzwojenia transformatora

Na rys. 7.3a przedstawione są oscylogramy napięć (względem ziemi) zdjęte w siedmiu punktach uzwojenia transformatora. Prowadząc prostą pionową w punkcie odpowiadającym chwili $t = t_1$ (np. $t_1 = 20 \mu s$), otrzymujemy w wyniku przecięcia się tej prostej z oscylogramami szereg punktów, których rzędne oznaczają wartości napięć w chwili t_1 w odpowiednich punktach uzwojeń. Przenosząc poszczególne rzędne na rys. 7.3b, gdzie osią odciętych jest x (odległość wybranego punktu uzwojenia od punktu uziemienia), otrzymujemy chwilowy rozkład napięcia wzdłuż uzwojenia w chwili t_1 . W podobny sposób można wyznaczyć rozkład napięcia w dowolnej chwili czasu liczonej od momentu doprowadzenia udaru do zacisku wejściowego uzwojenia transformatora.

Jeżeli wybierzemy z każdego oscylogramu z rys. 7. 3a maksymalną wartość napięcia, nie zwracając uwagi na moment, w którym ona występuje, otrzymamy

rozkład maksymalnych wartości napięć pojawiających się w poszczególnych punktach uzwojenia. Rozkład ten nosi nazwę **obwiedni drgań** lub inaczej **obwiedni przebieg**. Jest to bardzo ważne pojęcie w zagadnieniach transformatorowych, gdyż ono to w znacznej mierze decyduje o wymiarach izolacji głównej transformatora.

Pomiary rozkładów napięcia wykonuje się zwykle przy niskim napięciu przy zastosowaniu generatora fali prostokątnej, o częstotliwości umożliwiającej uzyskanie wyraźnego przebiegu na ekranie oscyloskopu a uzyskane wyniki przelicza się w stosunku do napięcia probierczego, co pozwala uzyskać rzeczywisty rozkład napięcia na uzwojeniu przy próbie udarowej. Wyniki uzyskane w ten sposób są poprawne, bowiem zjawisko nasycenia obwodów ferromagnetycznych nie ma przy przebiegach udarowych istotnego znaczenia (strumień magnetyczny szybkozmenny nie wnika w głąb żelaznych blach). Można również stwierdzić, że po usunięciu rdzenia i zastąpieniu go uziemioną tuleją z blachy, przebiegi napięciowe wewnątrz uzwojenia niewiele się zmieniają.

1.4. Rozkład początkowy i końcowy

Jak wynika z powyższych rozważań, dla uzwojenia transformatora przy przebiegach udarowych można wyznaczyć rodzinę chwilowych rozkładów napięcia, jeżeli przyjąć jako parametr czas t , czyli można uzyskać nieskończenie wiele rozwiązań dla układu zastępczego.

W praktyce jednak największą rolę odgrywa znajomość rozkładu napięcia dla $t = 0$ i $t = \infty$. Te dwa wybrane rozkłady napięć z rodziny rozwiązań nazywane są: odpowiednio rozkładem początkowym i rozkładem końcowym. Ściśle biorąc nie idzie tu o rozkład końcowy (czyli rozkład narzucony przez rezystancje cewek) lecz tzw. rozkład pseudokońcowy wytwarzany na drodze indukcyjnej, gdyż to on właśnie, a nie rozkład końcowy stanowi oś drgań uzwojenia (drgania już dawno zanikły, gdy ustala się rozkład końcowy). We wszystkich przypadkach oprócz autotransformatora zaatakowanego udarem od strony zacisku niskiego napięcia oba te rozkłady przebiegają identycznie i dlatego często używa się terminu „rozkład końcowy” zamiast „rozkład pseudokońcowy”. Także w przypadku przebiegów przenoszonych na uzwojenie niezaatakowane trzeba mówić o przeniesieniu rozkładu pseudokońcowego, gdyż końcowy w ogóle nie mógłby być przeniesiony. Różnica między tymi dwoma pojęciami zostanie wyjaśniona w p.1.8.

Jeśli punkt A układu pokazanego na rys.7.1 zostanie zaatakowany udarem prostokątnym, impuls będzie się przemieszczał wzdłuż uzwojenia, przy czym – ze względu na bardzo stromy wzrost napięcia – w początkowej chwili o rozkładzie napięcia będą decydowały tylko pojemności wzdłużne K i poprzeczne C . Mówi-



my, że rozkład początkowy ma charakter pojemnościowy. Na ogół rozkład początkowy jest wybitnie niejednostajny i charakteryzowany jest przez współczynnik:

$$\alpha = \sqrt{\frac{C'}{K'}} \quad (7.1)$$

gdzie: C' - wypadkowa pojemność doziemna,

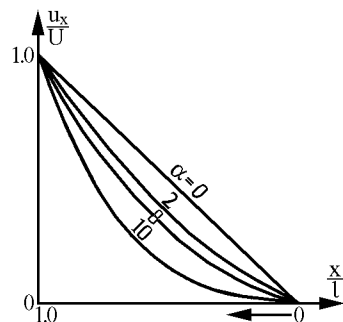
K' - wypadkowa pojemność szeregową.

Jeśli $\alpha > 3$, rozkład początkowy napięcia nie zależy od sposobu uziemienia punktu gwiazdowego i może być opisany następującym równaniem:

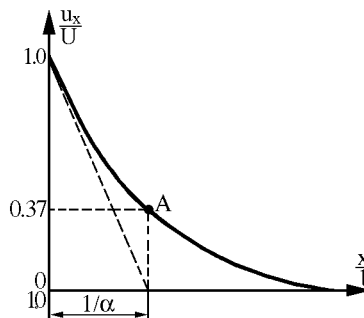
$$u_x = U e^{-\alpha(1-x)}$$

gdzie: U - wartość szczytowa udaru prostokątnego atakującego zacisk liniowy transformatora.

We współczesnych konstrukcjach transformatorów współczynnik α zawiera się w granicach od 3 do 30. Przykładowy rozkład początkowy napięcia wzdłuż uzwojenia transformatora w przypadku uziemionego punktu gwiazdowego dla różnych współczynników α podaje rys. 7.4.



Rys. 7.4. Rozkład początkowy napięcia



Rys. 7.5. Eksperymentalny sposób wyznaczania wartości współczynnika α

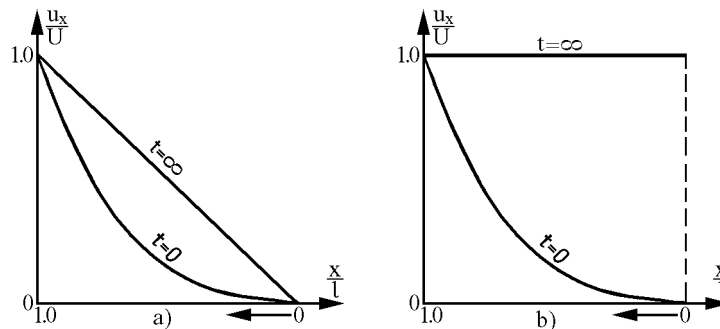
Nierównomierny rozkład początkowy jest przyczyną występowania bardzo dużych spadków napięć izolacji wzdłużnej pierwszych kilku cewek (zwłaszcza na pierwszym kanale międzycewkowym).

Znając rozkład początkowy napięcia, wartość współczynnika α można wyznaczyć również na podstawie konstrukcji graficznej (Rys. 7.5), odwrotność bowiem współczynnika α jest podstyczną krzywej wykładniczej rozkładu początkowego.



W praktyce wygodniej jest poprowadzić prosta poziomą, której odpowiada rzędna $\frac{u}{U}=0,37$. Można dowiedzieć, że odcięta punktu A jest odwrotnością współczynnika α .

W przypadku, gdy udar jest doprowadzony do uzwojenia jest udarem praktycznie prostokątnym, po czasie rzędu setek mikrosekund ustala się wzdłuż uzwojenia nowy rozkład napięcia, tj. rozkład końcowy. Może on różnić się w znaczny sposób od rozkładu początkowego i jest zależny od sposobu uziemienia punktu gwiazdowego (rys. 7.6). Rozkład końcowy ma charakter czysto rezystancyjny i jest praktycznie prostoliniowy.

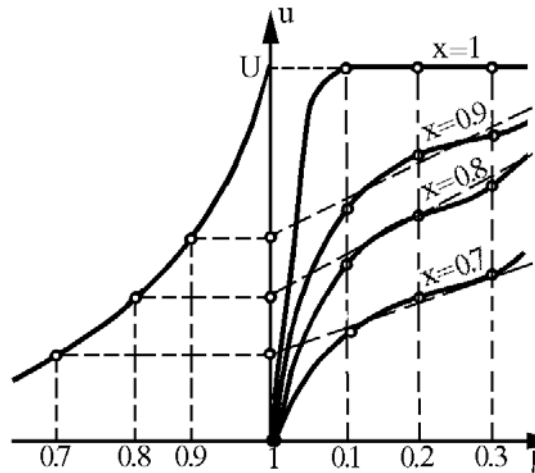


Rys. 7.6. Rozkłady napięcia wzdłuż uzwojenia transformatora:
początkowy ($t = 0$) i końcowy ($t = \infty$).
a) punkt gwiazdowy uziemiony,
b) punkt gwiazdowy izolowany

1.5. Doświadczalny sposób wyznaczania rozkładu początkowego

Rozkład początkowy napięcia można wyznaczyć eksperymentalnie, doprowadzając do badanego uzwojenia transformatora udary praktycznie prostokątne i rejestrując oscylografem o bardzo szybkim zapisie napięcie względem ziemi w kilku wybranych punktach uzwojenia, np. dla $x = 1, 0,9, 0,8, 0,7$ (rys. 7.7). We wszystkich badanych punktach wystąpi w pierwszej chwili bardzo stromy wzrost napięcia (przypominający czoło udaru doprowadzonego), a następnie znacznie łagodniejszy przebieg, stanowiący początkową fazę rozwojową drgań własnych uzwojenia. Na tych łagodniejszych częściach oscylogramów wybiera się po 3 - 4 punkty (np. dla chwili 0,1, 0,2, 0,3 μs). Prosta interpolowana między tymi punktami odcinie na osi rzędnych przybliżoną wartość napięcia początkowego w

danym punkcie x . Przenosząc odpowiednio te wartości na płaszczyznę o współrzędnych (x, y) , otrzymujemy rozkład początkowy.



Rys. 7.7. Eksperymentalny sposób wyznaczania rozkładu początkowego napięcia przez interpolację

1.6. Przybliżona metoda wyznaczania obwiedni drgań

Różnice w rozkładach początkowych i końcowych są przyczyną powstawania w uzwojeniach przebiegów wyrównawczych (nieustalonych). Ze względu na małe tłumienie, przebiegi te mają charakter oscylacyjny. Wartości chwilowe tych przebiegów zależą od rozkładu początkowego oraz końcowego i są tym silniejsze, im bardziej rozkłady te różnią się między sobą. Proces nieustalony jest przyczyną powstania dużych naprężeń w izolacji transformatorów, zarówno głównej (doziemnej) jak i wzdłużnej (międzycewkowej).

Przykładowy przebieg procesów nieustalonych w transformatorze, przy doprowadzeniu do jego zacisku udaru prawie prostokątnego, podaje rys. 7.8.

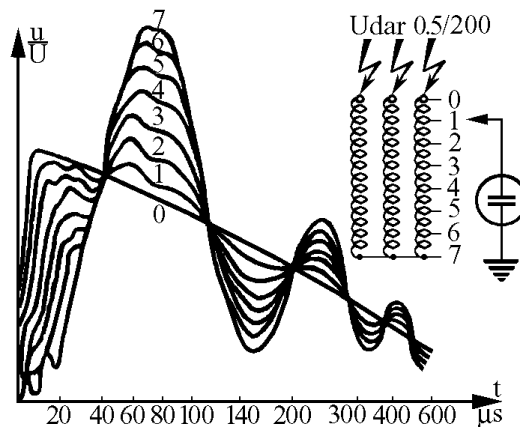
Przybliżony kształt obwiedni drgań można wyznaczyć w bardzo prosty sposób, posługując się wykresami początkowego (u_0) i końcowego (u_∞) rozkładu napięcia. Między $u_{\max}$, u_0 i u_∞ istnieje bowiem dla każdego x zależność:

$$u_{\max} - u_\infty = u_\infty - u_0 \quad (7.2)$$

Powyższe równanie opisuje zależność pomiędzy odnośnymi krzywymi w przypadku braku tłumienia; w rzeczywistości tłumienie występuje zawsze i dla-



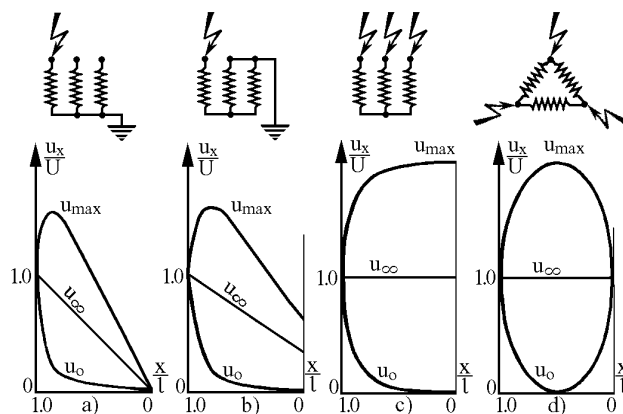
tego rzeczywista obwiednia przepięć (trudna do dokładnego obliczenia) leżeć będzie poniżej obwiedni przybliżonej wyznaczonej z równania (7.2).



Rys. 7.8. Oscylogramy przebiegów udarowych zarejestrowane w 8 punktach transformatora po doprowadzeniu udaru (0/200 μ s, logarytmiczna skala czasu, punkt gwiazdowy izolowany)

Metody wykreślne oparte na tej zależności, mimo ich przybliżonego charakteru, są bardzo przydatne do prowadzenia wstępnej analizy przepięć, zwłaszcza w skomplikowanych układach uzwojeń. Naszkicowanie rozkładów początkowego i końcowego nie nastręcza na ogół większych trudności. Dodając do rzędnych rozkładu końcowego różnicę rzędnych rozkładu końcowego i początkowego otrzymuje się przybliżoną obwiednię przepięć, podczas gdy obliczenie obwiedni w sposób ścisły jest w wielu przypadkach wręcz niewykonalne bez użycia komputerów.

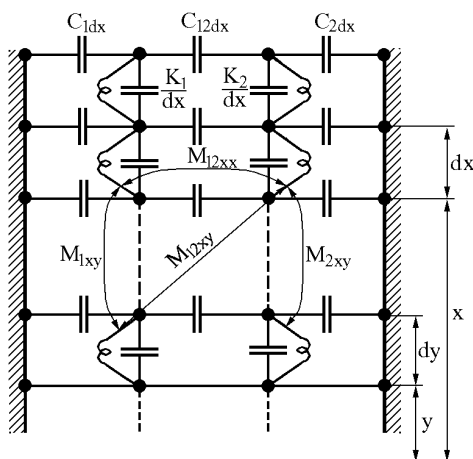
Na rys. 7.9a, b, c przedstawiono wykreślone tą metodą obwiednie drgań uzwojeń transformatora o parametrze $\alpha = 10$, połączonych w gwiazdę. Bez trudności można naszkicować także obwiednię dla dowolnych innych przypadków, np. dla uzwojenia połączanego w trójkąt i zaatakowanego we wszystkich trzech zaciskach jednakowymi udarami. Do każdego uzwojenia fazowego doprowadzone są z obu jego końców takie same udary. W celu wyznaczenia rozkładu początkowego i końcowego korzystać można zatem z zasady superpozycji. Przybliżoną obwiednię drgań wykreśla się korzystając z równania (7.2). Rozkład końcowy jest prostą poziomą ponieważ każdy z dwóch udarów „widzi” przed sobą uzwojenie o izolowanym końcu. Największe przepięcie w uzwojeniu połączonym w trójkąt wystąpią, jak widać, pośrodku uzwojenia.



Rys. 7.9. Przybliżony sposób wyznaczania obwiedni drgań w uzwojeniach fazowych zaatakowanych udarem prostokątnym.

1.7. Przepięcia udarowe w uzwojeniu wtórnym.

Elementarny schemat dwuuzwojeniowego transformatora dla szybkozmiennych przebiegów (przebiegi udarowe) ma postać taką, jak na rys. 7.10.



Rys. 7.10. Schemat zastępczy transformatora dwuuzwojeniowego:

C_1dx – pojemności doziemne uzwojenia 1, C_2dx – pojemności doziemne uzwojenia 2, K_1/dx – pojemności wzdłużne uzwojenia 1, K_2/dx – pojemności wzdłużne uzwojenia 2, $C_{12}dx$ – pojemności wzajemne uzwojeń, M_{1xy} – międzyzwojowe współczynniki indukcyjności wzajemnej uzwojenia 1, M_{2xy} – międzyzwojowe współczynniki indukcyjności wzajemnej uzwojenia 2, M_{12xy} – współczynniki indukcyjności wzajemnej między dowolnym zwojem x uzwojenia 2 a dowolnym zwojem y uzwojenia 1, M_{12xx} – współczynniki indukcyjności wzajemnej między dowolnym zwojem x uzwojenia 2 a dowolnym zwojem x uzwojenia 1

Przedstawiając w uproszczony sposób zjawisko przenoszenia się przepięć w transformatorze można stwierdzić, że po doprowadzeniu prostokątnej fali udarowej napięcia do uzwojenia pierwotnego, w obu uzwojeniach zjawia się początkowy rozkład napięcia. Można go obliczyć na podstawie schematu zastępczego (rys. 7.10) przy pominięciu sprzężeń magnetycznych. W stanie równowagi układu ustali się w obu uzwojeniach rozkład końcowy, określony wyłącznie przez sprzężenie magnetyczne.

Przejście od stanu początkowego (rozkład początkowy) do stanu ustalonego (rozkład końcowy) odbywa się przez tłumione drgania w obydwu sprzężonych ze sobą uzwojeniach. Ogólnie można wyodrębnić w poszczególnych uzwojeniach dwa rodzaje drgań tłumionych:

- 1) drgania własne – analogiczne do drgań obserwowanych w uzwojeniu samotnym,
- 2) drgania wymuszone – które można interpretować jako przeniesione na drodze indukcyjnej drgania własne drugiego uzwojenia.

Równanie różniczkowe opisujące początkowy rozkład napięcia w uzwojeniu wtórnym (rys. 7.10) ma następującą postać:

$$\frac{d^4 U_2}{dx^4} - \left[\frac{C_1 + C_{12}}{K_1} + \frac{C_2 + C_{12}}{K_2} \right] \frac{d^2 U_2}{dx^2} + \frac{(C_1 + C_{12})(C_3 + C_{12}) - C_{12}^2}{K_1 \cdot K_2} U_2 = 0 \quad (7.3)$$

Identyczne równanie różniczkowe można uzyskać dla rozkładu początkowego w uzwojeniu pierwotnym (dla U_1). Przy uwzględnieniu warunków brzegowych – powyższe równanie jest pełnym rozwiązaniem schematu pojemnościowego transformatora. Warunki brzegowe są różne dla różnych sposobów uziemienia uzwojeń. Można wyodrębnić cztery warianty:

- 1) punkt gwiazdowy uzwojenia 1 uziemiony, uzwojenia 2 – uziemiony,
- 2) punkt gwiazdowy uzwojenia 1 uziemiony, uzwojenia 2 – izolowany,
- 3) punkt gwiazdowy uzwojenia 1 izolowany, uzwojenia 2 – uziemiony,
- 4) punkt gwiazdowy uzwojenia 1 izolowany, uzwojenia 2 – izolowany.

Przykładowo rozpatrzmy warunki brzegowe w przypadku obydwu punktów gwiazdowych uziemionych, kiedy do uzwojenia pierwotnego doprowadzono prostokątną falę udarową U , a uzwojenie wtórne jest nieobciążone. Dla fali prostokątnej, w chwili $t = 0$ dla $x = 1$, mamy warunek:

$$(U_1)_{x=1} = U, \quad (7.4)$$

dla zacisku nieobciążonego uzwojenia wtórnego:



$$\left(\frac{dU_2}{dx} \right)_{x=1} = 0 \quad (7.5)$$

oraz dla uziemionych punktów gwiazdowych

$$(U_1)_{x=0} = (U_2)_{x=0} = 0 \quad (7.6)$$

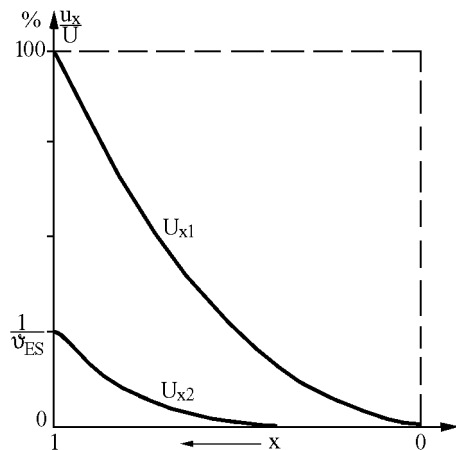
Rozwiązaniem powyższego równania dla wymienionych warunków brzegowych $x = 1$ jest zależność następująca:

$$(U_2)_{x=1} = U_2 = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_2 + \sqrt{\frac{K_2}{K_1}(C_1 C_2 + C_1 C_{12} + C_2 C_{12})}} U = \frac{U}{v_{ES}} \quad (7.7)$$

gdzie: v_{ES} – przekładnia elektrostacyjna (przekładnia pojemnościowa).

W przypadku $K_1 \gg K_2$ wyrażenia na przekładnię elektrostacyjną można uprościć do postaci:

$$\frac{1}{v_{ES}} \approx \frac{C_{12}}{C_{12} + C_2} \quad (7.8)$$



Rys. 7.11. Rozkłady początkowe uzwojenia pierwotnego i wtórnego

Jak widać, w przypadku zaniedbania pojemności wzdłużnych K_1 i K_2 , można traktować uzwojenia transformatora dla rozkładu początkowego jak zwykły dzielnik pojemnościowy. Z reguły jednak pojemności wzdłużne komplikują to zagadnienie.

Rozwiązanie omawianego równania pozwala na wykreślenie rozkładu początkowego w obydwu uzwojeniach transformatora (rys. 7.11). W praktyce oblicza się tylko napięcie początkowe uzwojenia wtórnego w punkcie $x = 1$.

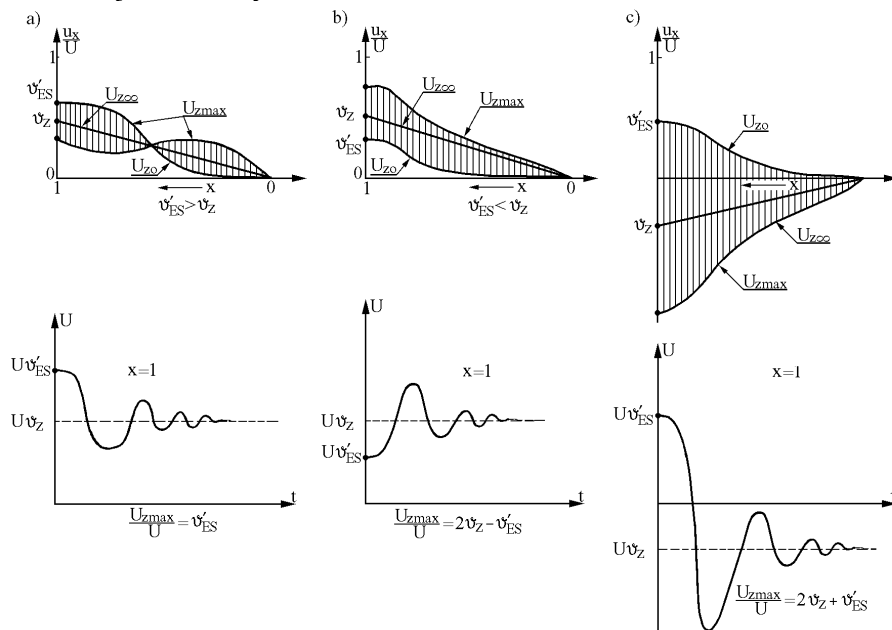
Oprócz rozkładu początkowego na uzwojenie wtórne przenosi się także rozkład pseudokońcowy, który – podob-



nie jak w uzwojeniu zaatakowanym jest - rozkładem prostoliniowym. O tym jak będzie przebiegał decyduje przekładnia zwojowa transformatora $v_z = z_2 / z_1$

Na rys. 7.12 są podane przykładowo rozkłady napięcia początkowego, końcowego i obwiednie drgań dla trzech przypadków:

a) $v_{ES} < v_z$, b) $v_{ES} > v_z$ i c) uzwojenia o przeciwnym kierunku nawinięcia, a także przykłady oscylogramów, jakie można zaobserwować w punkcie $x=1$ dla poszczególnych przypadków oraz wzory określające maksymalne wzrosty napięcia w uzwojeniu wtórnym.

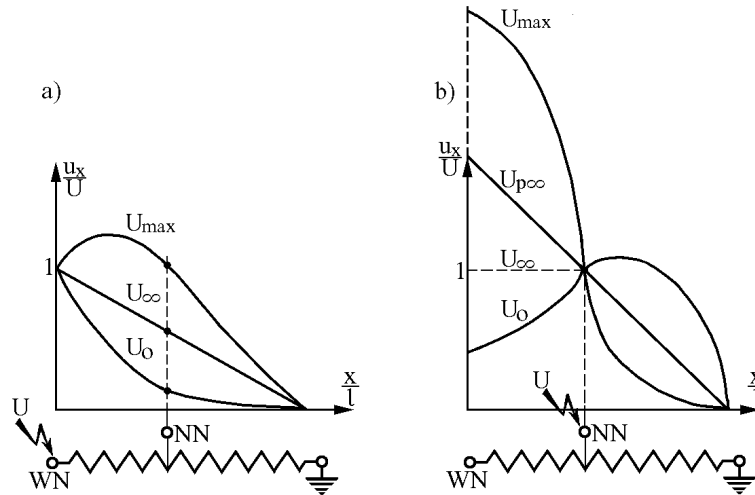


Rys. 7.12. Rozkłady napięcia początkowego, pseudokońcowego i obwiedni drgań dla różnych przypadków: a) $v_{ES} > v_z$, b) $v_{ES} < v_z$, c) uzwojenia o przeciwnym kierunku nawinięcia.

1.8. Przepięcia w autotransformatorach

W autotransformatorach przepięcia występują w znacznie ostrzejszej formie niż w transformatorach. Szczególnie narażone jest uzwojenie szeregowo. Rozkłady napięć w uzwojeniach autotransformatora podano przykładowo na rys. 7.13.

W przypadku doprowadzenia udaru prostokątnego do zacisku NN autotransformatora, prąd płynący w tym uzwojeniu wynika z superpozycji dwóch składowych: jedna wynika z drgań wysokiej częstotliwości i szybko ulega stłumieniu, druga to prąd wykładniczo narastający płynący przez indukcyjność poprzeczną transformatora (rys. 7.10) Indukcyjności poprzecznej nie ma oczywiście na schemacie zastępczym z rys. 7.1, gdyż jest to schemat obowiązujący tylko do analizy przepięć udarowych. Gdyby drgań wysokiej częstotliwości nie było, jedynym prądem rejestrowanym w układzie byłby narastający wykładniczo prąd płynący przez indukcyjność główną pod wpływem napięcia stałego doprowadzonego skokowo. W rzeczywistości oba te procesy się na siebie nakładają i stąd



Rys. 7.13. Obwiednie przepięć, rozkłady końcowe i początkowe w uzwojeniach autotransformatora: a) zaatakowanego od strony WN, b) zaatakowanego od strony NN

– gdybyśmy oscylografowali prąd uzwojenia – otrzymalibyśmy przebieg pokazany na szkicu z rys. 7.14. Jak z tego rysunku wynika, osią drgań prądu nie jest jego wartość ustalona I_u , gdyż ta zostanie osiągnięta po bardzo długim czasie (stała czasu narastanie prądu τ jest liczona w sekundach), lecz początkowy fragment krzywej wykładniczej o długości czasowej Δt . Ponieważ $\Delta t \ll \tau$, możemy uznać, że odcinek krzywej wykładniczej odpowiadający Δt jest praktycznie odcinkiem linii prostej. Prąd wykładniczy jest w innej skali strumieniem przenikającym kolumnę autotransformatora, na której nawinięte są oba uzwojenia: szeregowo i wspólne. Siła elektromotoryczna indukowana przez ten strumień



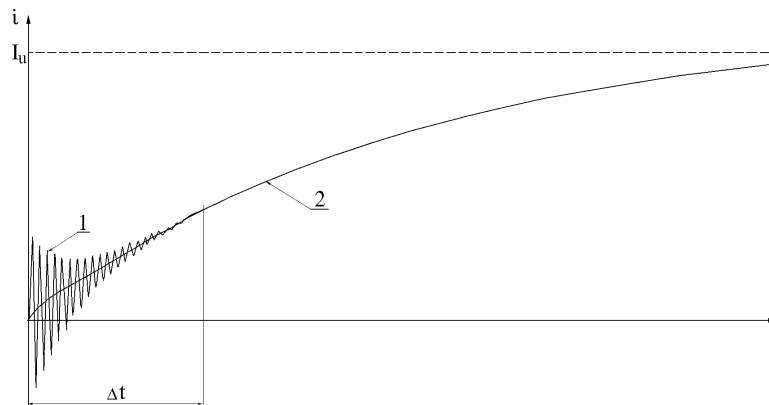
w dowolnym punkcie uzwojenia oddalonym o x od jego końca wynika ze znanej zależności:

$$e_x = z_x \frac{d\Phi}{dx} \quad (7.9)$$

Ponieważ jednak zgodnie z założeniem o początkowej prostoliniowości przebiegu prądu $\frac{d\Phi}{dx} = \text{const.}$, równanie (7.9) przybierze postać:

$$e_x = z_x \cdot \text{const.} \quad (7.10)$$

Wynika z tego, że siła elektromotoryczna indukowana w dowolnym punkcie uzwojenia jest proporcjonalna do liczby zwojów liczonej od jego końca, czyli jest linią prostą. W uzwojeniu szeregowym autotransformatora wytworzy się zatem rozkład pseudokońcowy będący prostoliniowym przedłużeniem rozkładu w uzwojeniu wspólnym. Rozkład końcowy natomiast będzie odcinkiem prostej równoległej do osi odciętych, gdyż jest to – z punktu widzenia zacisku NN – uzwojenie o izolowanym końcu. Oczywiście osią drgań jest rozkład pseudokońcowy, a nie końcowy i z tego wynikają właśnie duże przebiegi na uzwojeniu szeregowym. Wzór (7.9) stosuje się oczywiście także i do transformatorów ale tam wynikający z niego rozkład pokrywa się dokładnie z rozkładem końcowym.



Rys. 7.14. Prąd drgań uzwojenia (1) i prąd płynący przez indukcyjność główną autotransformatora (2) pod wpływem udaru prostokątnego. $I_u = U/R$ - ustalona wartość prądu

1.9. Sposoby poprawiania rozkładu początkowego w uzwojeniach transformatorów (metody wyrównania rozkładu początkowego)

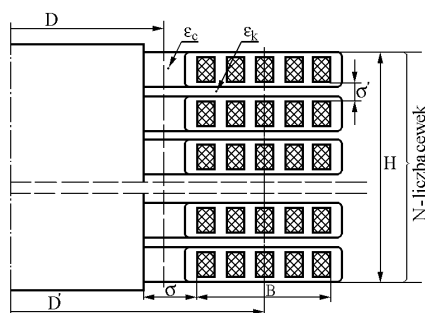
1. Wpływ wymiarów uzwojenia na rozkład początkowy

Dla uzwojeń cewkowych współczynnik α charakteryzujący rozkład początkowy można wyznaczyć według następującego wzoru (oznaczenia takie, jak na rys. 7.15):

$$\alpha = \sqrt{\frac{\epsilon_c \cdot D}{\epsilon_k \cdot D'}} \cdot \sqrt{\frac{H}{B} \cdot \frac{N\delta'}{\delta}} \quad (7.11)$$

Z powyższego wzoru wynika, że mniejsze α mają uzwojenia pękate, większe zaś uzwojenia smukłe. Poprawianie rozkładu napięcia celowe jest zatem zwłaszcza w tym drugim przypadku. Analiza równania (7.11) pokazuje, że:

- 1) rozkład początkowy można poprawić zwiększając grubość i zmniejszając wysokość uzwojenia (uwaga: zwykle jednak te parametry są narzucone przez inne znamiona transformatora);
- 2) rozkład początkowy można poprawić zasilając uzwojenie pośrodku; w ten sposób wysokość uzwojenia maleje do $\frac{1}{2}H$;
- 3) zastosowanie tzw. „miękkiej” izolacji transformatora pogarsza rozkład początkowy, gdyż dobre właściwości tej izolacji pozwalają zmniejszyć δ , a poza tym ma on większą przenikalność dielektryczną ϵ_c .



Rys. 7.15. Schemat wymiarów uzwojenia cewkowego

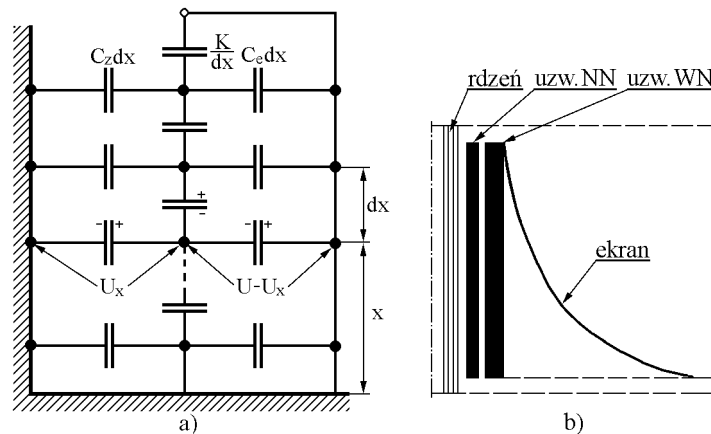
2. Ekrany

Jeżeli w pojemnościowym schemacie zastępczym uzwojenia transformatora do każdego punktu węzłowego dołączymy pojemność $C_{ex}dx$ z drugiej strony przyłączoną do zacisku liniowego (rys. 7.15) i taką aby był spełniony warunek:

$$\frac{C_{ex}}{C_z} = \frac{U_x}{U - U_x} \quad (7.12)$$

gdzie: U – napięcie na ucisku liniowym,

to przez pojemność $C_{ex}dx$ przy $U - U_x$ będzie płynął taki sam prąd, jak przez pojemność C_zdx przy napięciu U_x . Prądy te więc skompensują się wzajemnie i pojemnościowy rozkład napięcia (rozkład początkowy) będzie zależał od pojemności $\frac{K}{dx}$ i jeśli te pojemności będą jednakowe, to będzie on rozkładem liniowym (czyli $\alpha = 0$) (rys. 7.17).



Rys. 7.16. Schemat kompensacji pojemności doziemnych za pomocą ekranu:
a) ekran pojemnościowy, b) szkic ekranu idealnego o kształcie hiperboloidy obrotowej

Można udowodnić, że aby ekranowanie doprowadziło do prostoliniowego rozkładu początkowego, ekran powinien mieć kształt hiperboloidy, co oczywiście jest nie do zrealizowania. W zamian stosować można ekranowanie tylko części uzwojenia – zasadę takiego ekranowania pokazano na Rys.7.17. Takie ekranowanie jest w przypadku transformatorów rozwiązaniem przestarzałym i obecnie zupełnie niestosowanym. Zamiast tego stosuje się ekrany toroidalne usytuowane nad pierwszą cewką, poprawiające rozkład napięcia na kanałach bliskich zaciskowi liniowemu transformatora, które naprężane są najbardziej.

3. Inne sposoby poprawiania rozkładu początkowego napięcia

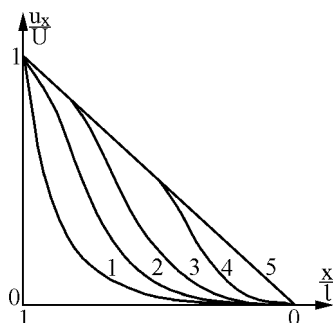
Z innych stosowanych sposobów wyrównania rozkładu początkowego napięcia w uzwojeniach transformatorów należy wymienić:

- 1) Zwiększenie pojemności wzdłużnej uzwojeń cewkowych przez przyłączenie odczepów uzwojenia do dzielnika pojemnościowego
- 2) zastosowanie rezystancyjnego dzielnika napięcia; dzielnik taki połączony w wielu punktach z uzwojeniem wymusza w nim równomierny rozkład napięcia tuż po doprowadzeniu udaru; dzielniki tego typu są zbudowane z płytek zmiennooporowych podobnie, jak stos zmiennooporowy odgromnika,

Rozwiązania powyższe mają charakter historyczny. Ustały miejsca nowoczesnym konstrukcjom:

- 3) uzwojeniom splatany
- 4) uzwojeniom z wplatany ekranami (w tym przypadku możliwe jest nawet obniżenie wartości współczynnika α praktycznie do zera).

Tam, gdzie to jest możliwe stosuje się także uzwojenia warstwowe.



Rys. 7.17. Rozkłady początkowe napięcia w zależności od stopnia ekranowania uzwojenia

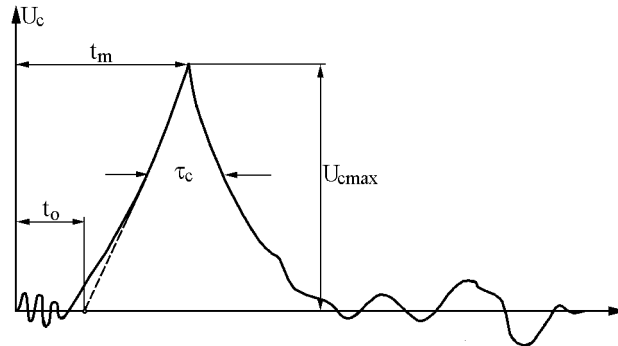
1 – uzwojenie nieekranowane, 2 – uzwojenie ekranowane na 15 % wysokości, 3 – uzwojenie ekranowane na 50 % wysokości, 4 – uzwojenie ekranowane na 75 % wysokości, 5 – uzwojenie ekranowane na 100 % wysokości

1.10. Przepięcia międzycewkowe

Metody obliczania przepięć na izolacji wzdłużnej (np. izolacja międzycewkowa) są skomplikowane i wymagają często stosowania komputerów (wyjątek stanowi pierwszy kanał międzycewkowy, dla którego można posłużyć się rozkładem początkowym). Zasadnicze znaczenie mają więc oscylograficzne pomiary przepięć międzycewkowych przeprowadzone na modelach względnie na prototypach transformatorów.

Jak wynika z rys. 7.17 na kanale międzycewkowym, uzwojenia zaatakowanego udarem napięciowym, występują znaczne przepięcia o krótkim czasie trwania wymuszone przez czoło udaru. Oprócz tego głównego przepięcia wystę-

pują przebiegi dodatkowe w postaci oscylacji tłumionych, których amplituda zwykle nie przekracza 50% wartości szczytowej przebiegu głównego, którego wartość szczytowa $U_{c\max}$ i czas trwania półszczytu τ_c decydują o stopniu zagrożenia izolacji.



Rys. 7.18 Oscylogram przebiegu napięcia międzycewkowego
 $U_{c\max}$ – maksymalne napięcie międzycewkowe, t_o – czas oczekiwania, t_m – czas wystąpienia maksimum, τ_c – czas trwania półszczytu

Jeżeli pojemności wzdłużne z Rys.7.1 są niewielkie, czwórnik łańcuchowy reprezentujący uzwojenie można traktować jako ułomny tor ruchu falowego. Czas t_m , który upływa od chwili wystąpienia maksimum napięcia na kanale międzycewkowym jest zatem prawie proporcjonalny do odległości danego kanału od zacisku liniowego uzwojenia. Napięcia międzycewkowe przemieszczają się wzdłuż uzwojenia w sposób podobny do ruchu fali wędrownej wzdłuż linii napowietrznej. Porównując oscylogramy napięć na dwóch dostatecznie odległych kanałach międzycewkowych i znając długość uzwojenia mierzonego wzdłuż drutu nawojowego, można wyznaczyć prędkość ruchu falowego w uzwojeniu:

$$v = \frac{x_1 - x_2}{t_{m2} - t_{m1}} l_u \quad \left[\frac{\text{m}}{\mu\text{s}} \right] \quad (7.13)$$

gdzie: x_1 i x_2 – względne odległości rozpatrywanych kanałów od zacisku zerowego.

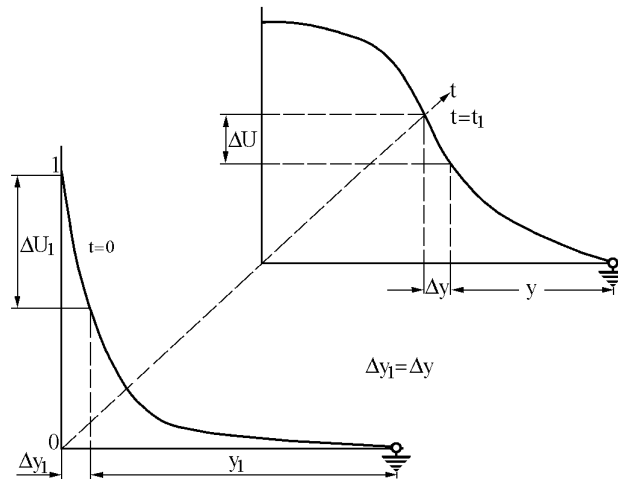
Zwykle prędkości ruchu falowego dla uzwojeń transformatorów zawierają się w granicach $100 \div 180 \frac{\text{m}}{\mu\text{s}}$.

Zjawisko przenoszenia się maksymalnej wartości przebiegu międzycewkowego wzdłuż uzwojenia ilustruje rys. 7.19. Przedstawiono na nim dwa chwilowe rozkłady napięcia wzdłuż uzwojenia – rozkład chwili $t = 0$ (rozkład początkowy)

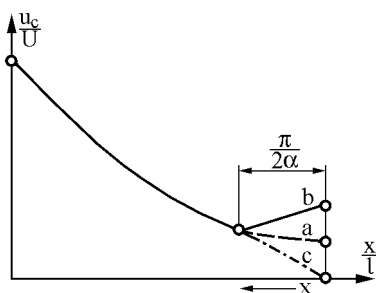
i w chwili $t = t_1 = \frac{y}{v}$ (v – prędkość ruchu falowego w transformatorze). Widać

wyraźnie, że w chwili $t = 0$ maksymalne napięcie wystąpi na pierwszym kanale międzycewkowym podczas, gdy na kanale oddalonym o y od punktu gwiazdowego będzie niewielkie. Inaczej będzie dla chwili t_1 , gdzie największe napięcie wystąpi na kanale oddalonym o y od punktu gwiazdowego, na którym akurat jest punkt przegięcia rozkładu chwilowego (występuje maksymalna stromość rozkładu) podczas, gdy na pierwszym kanale napięcie będzie minimalne.

Wartość szczytowa przebiegu międzycewkowych maleje w miarę oddalania się od zacisku liniowego, przy czym w pobliżu punktu gwiazdowego wartości szczytowe przebiegu przedstawiają się tak, jak gdyby zachodziło tam zjawisko odbijania się fali napięciowej. Rozkład wartości szczytowych przebiegu międzycewkowych (obwódka przebiegu międzycewkowych) jest pokazany na rys. 7.20. Czas trwania półszczytu przebiegu głównego wzrasta w miarę oddalania się od zacisku liniowego.



Rys. 7.19. Rozkłady chwilowe napięcia ilustrujące zjawisko przenoszenia się maksymalnej wartości przebiegu międzycewkowego wzdłuż uzwojenia

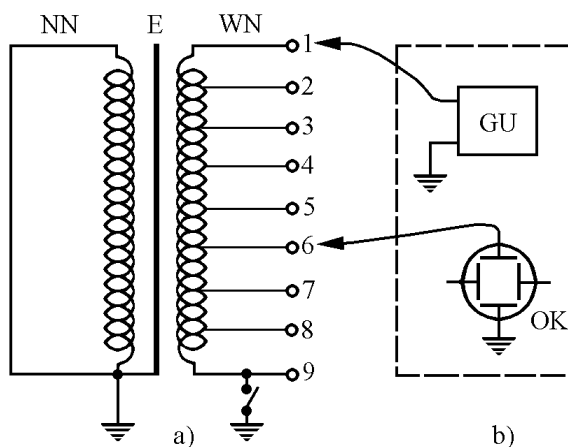


Rys. 7.20. Obwiednia przepięć międzycewkowych: a – bez uwzględnienia odbicia fali od punktu gwiazdowego, b – dla uziemionego punktu gwiazdowego, c – dla izolowanego punktu gwiazdowego

2. POMIARY

2.1. Pomiar rozkładu napięcia na modelu uzwojenia transformatora

Schemat połączeń



Rys. 7.21. Schemat pomiarowy: a) model uzwojenia transformatora, b) oscylograf do zapisu uderów wielokrotnych (patrz opis przyrządu w ćwiczeniu 6)

Wykonanie pomiarów

Za pomocą oscyloskopu zarejestrować przebiegi napięcia w dziewięciu punktach uzwojenia zgodnie z rys. 7.21 dla przypadków:

- a. koniec uzwojenia transformatora uziemiony,
- b. koniec uzwojenia transformatora izolowany,
- c. uzwojenia zaatakowane udarami z obu końców (symulacja jednej fazy uzwojenia połączonego w trójkąt zaatakowanego przez udary z trzech zacisków liniowych).

Wartości potrzebne do wyznaczania:

1. rozkładu początkowego napięcia,
2. rozkładu chwilowego napięcia dla $t = t_1$ (wartość t_1 poda prowadzący ćwiczenie),
3. obwiedni drgań

należy odczytać bezpośrednio z ekranu oscyloskopu. Ponadto należy wykreślić na wspólnym rysunku oscylogramy w trzech dowolnie wybranych punktach uzwojenia. Wyniki pomiarów zestawzić w tabeli.

Opracowanie wyników pomiarów

W sprawozdaniu należy podać wykresy:

1. rozkładu początkowego,
2. rozkładu chwilowego,
3. obwiedni drgań pomierzonej i wyznaczonej na podstawie wzoru (7.2).

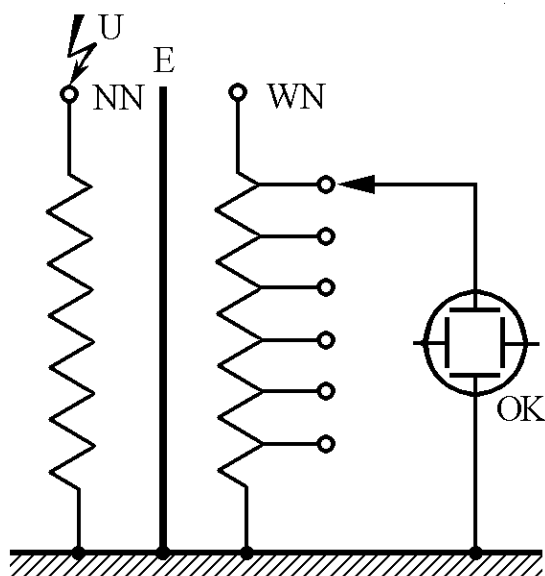
Wszystkie charakterystyki dotyczące tego samego przypadku należy wykreślić na wspólnym rysunku. Ponadto należy obliczyć:

- największą względną wartość napięcia na izolacji głównej transformatora,
- największą wartość napięcia na izolacji wzdłużnej (dla $t = 0$),
- wartość współczynnika α , wyznaczoną graficznie na podstawie znajomości rozkładu początkowego (rys. 7.5).



2.2. Wyznaczanie przekładni elektrostacyjnej

Schemat połączeń



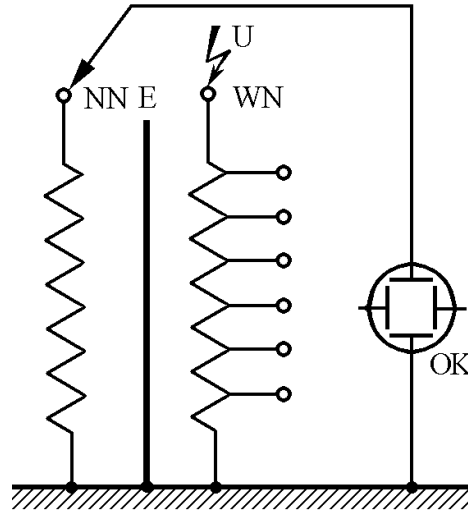
Rys. 7.22. Schemat pomiarowy

Jak wynika z rys. 7.12 przekładnię elektrostacyjną można wyznaczyć wykonując oscylogram przebiegu napięciowego w punkcie uzwojenia o $x = 1$. W tym celu należy połączyć badany model według schematu z rys. 7.22 i wykreślić oscylogramy napięcia.

W sprawozdaniu należy zamieścić oscylogram wykonany na zacisku (1) uzwojenia WN oraz obliczenie przekładni elektrostacyjnej badanego modelu.

2.3. Ocena oscylogramów przebiegów napięciowych w uzwojeniu wtórnym

Schemat połączeń



Rys. 7.23. Schemat pomiarowy

1. W układzie, jak na rys. 7.23 należy zaobserwować zmiany przebiegów napięciowych w uzwojeniu NN przy zmianie liczby zwojów uzwojenia WN atakowanego udarem prostokątnym.

Uwaga: końce obydwu uzwojeń należy uziemić.

2. Zaobserwować zmiany przebiegów napięciowych w uzwojeniu NN przy zmianie sposobu przyłączenia punktów zerowych obu uzwojeń, dla przypadku:

- końce obu uzwojeń są uziemione,
- koniec uzwojenia NN jest uziemiony – WN izolowany,
- koniec uzwojenia NN jest izolowany – WN uziemiony,
- koniec obu uzwojeń są izolowane.

Wyniki obserwacji należy skomentować w sprawozdaniu.

2.4. Pomiar rozkładu napięcia na modelu uzwojenia autotransformatora

Wykonanie pomiarów

Wykorzystując uzwojenie WN badanego modelu jako jedną fazę uzwojenia autotransformatora i traktując zacisk (4) jako zacisk liniowy uzwojenia NN, zarejestrować przebiegi napięciowe w dziewięciu punktach uzwojenia (patrz rys. 7.20). Podczas pomiarów koniec uzwojenia należy uziemić (autotransformatory pracują z zawsze uziemionym punktem gwiazdowym).

Bezpośrednio z ekranu oscyloskopu odczytać wartości potrzebne do wykreślenia

1. rozkładu początkowego,
2. rozkładu w chwili t_1 (wartość t_1 poda prowadzący ćwiczenie),
3. obwiedni drgań.

Pomiary należy wykonać dla dwóch przypadków:

- a. autotransformator zaatakowany od strony WN,
- b. autotransformator zaatakowany od strony NN.

Wyniki pomiarów zanotować w tabeli.

Opracowanie wyników pomiaru

W sprawozdaniu należy wykreślić dla obydwu przypadków:

1. rozkłady początkowe,
2. rozkłady końcowe
3. obwiednie drgań pomierzone i wyznaczone ze wzoru (7.2).

Należy również:

- obliczyć maksymalne przebiecia na izolacji głównej obu uzwojeń autotransformatora,
- maksymalne przebiecia na izolacji wzdłużnej obu uzwojeń autotransformatora.

Krzywe dotyczące tego samego przypadku należy umieścić na wspólnym rysunku.



2.5. Pomiar rozkładu napięcia z zastosowaniem ekranowania uzwojenia

Wykonanie pomiarów

Dołączając ekran do zacisku liniowego uzwojenia WN badanego modelu, odczytać z oscylogramów wartości potrzebne do wykreślenia rozkładu początkowego w przypadku:

- a. końca uzwojenia izolowanego,
- b. końca uzwojenia uziemionego.

Opracowanie wyników pomiarów

W sprawozdaniu należy na wspólnym rysunku wykreślić rozkłady początkowe dla przypadków:

- c. uzwojenia nieekranowanego,
- d. uzwojenia ekranowanego (koniec uzwojenia izolowany i koniec uzwojenia uziemiony).

2.6. Pomiar przepięć międzycewkowych

Wykonanie pomiaru

Wykorzystując dwa wejścia oscyloskopu i przełączając go na pracę różnicową należy:

1. wykonać oscylogramy między poszczególnymi parami zacisków modelu, zaatakowanego prostokątnym udarem napięciowym (między zaciskami 1-2, 2-3, 3-4 itd.),
2. bezpośrednio z oscyloskopu odczytać i zanotować największą wartość przepięcia międzycewkowego pomiędzy daną parą zacisków i czas jej pojawienia się licząc od cewek 1 – 2,
3. przerysować oscylogramy przepięć międzycewkowych w punktach 1 + 2, 4 + 5, 8 + 9.

Opracowanie wyników pomiaru

1. Na podstawie pomiarów wykonanych w punkcie 1 należy wykreślić rozkład szczytowych wartości przepięć międzycewkowych,



2. Na podstawie oscylogramów wykonanych w punkcie 3 należy obliczyć prędkość ruchu falowego w uzwojeniu badanego modelu ($l_u = 780 \text{ m}$).

Uwaga:

1. Powyższe pomiary i obliczenia należy wykonać dla dwóch przypadków: a) koniec uzwojenia uziemiony, b) koniec uzwojenia izolowany.
2. W przypadku końca uziemionego, pomiary należy wykonać dla przypadków: uzwojenia ekranowanego i uzwojenia nieekranowanego.

3. UWAGI I WNIOSKI



ĆWICZENIE 8

BADANIE ODGROMNIKA ZAWOROWEGO

1. WIADOMOŚCI OGÓLNE

1.1. Wstęp

Przebiecia występujące w układach elektroenergetycznych w wyniku wyładowań atmosferycznych i operacji łączeniowych są zjawiskiem nieuniknionym. Ze względów ekonomicznych wytrzymałość napięciowa izolacji ma określony poziom, niższy niż poziom mogących pojawiać się przebiec, w szczególności przebiec piorunowych. Z tego powodu, dążąc do zapewnienia bezawaryjnej pracy, w układach stosuje się rozbudowany system ochrony od nadmiernych wzrostów napięcia, nazywany powszechnie systemem **ochrony przeciwprzebieciowej**. W układach sieciowych wysokiego napięcia na stacjach elektroenergetycznych powszechnie stosowanym urządzeniem ochronnym jest **odgromnik zaworowy**, występujący obecnie pod nazwą **ogranicznik przebiec** (norma PN IEC 99-1 „Iskiernikowe zaworowe ograniczniki przebiec do sieci prądu przemiennego” oraz norma PN IEC 99-4 „Beziskiernikowe zaworowe ograniczniki przebiec z tlenków metali do sieci prądu przemiennego”).

Zarówno "tradycyjne" iskiernikowe ograniczniki jak i nowoczesne ograniczniki z tlenków metali chronią urządzenia elektryczne od przebiec i mogą pracować razem w tej samej sieci. Nie jest nawet wymagane aby urządzenie elektryczne było chronione w trzech fazach przez ten sam rodzaj ogranicznika. Gdy ulegnie uszkodzeniu ogranicznik iskiernikowy można go zastąpić ogranicznikiem beziskiernikowym. Chociaż iskiernikowe ograniczniki skutecznie wypierane są przez lepsze, nowoczesne konstrukcje ograniczników z tlenków metali (MO), to będą one jeszcze przez wiele lat eksploatowane w zbudowanych w dawniejszych latach układach elektroenergetycznych do ochrony od przebiec.

W dalszej części tekstu będzie stosowana tradycyjna nazwa dla ograniczników przebiec, w odniesieniu do układów elektroenergetycznych wysokiego napięcia, a mianowicie: **odgromnik zaworowy** (iskiernikowy) oraz **odgromnik**



zaworowy beziskiernikowy lub **odgromnik MO**. W literaturze technicznej, anglojęzycznej, powszechnie stosowanym oznaczeniem dla beziskiernikowych ograniczników z tlenków metali jest właśnie symbol **MO** (MO = metal oxide → tlenek metalu).

1.2. Odgromnik zaworowy

Odgromnik zaworowy iskiernikowy składa się z dwóch zasadniczych elementów: iskiernika wielokrotnego i nieliniowej rezystancji (stosu zmiennooporowego) połączonych szeregowo i umieszczonych wewnątrz osłony izolacyjnej. Ideowy schemat działania takiego odgromnika przedstawiony jest na rysunku 8.1. Działanie atakowanego falą wędrowną odgromnika iskiernikowego można rozłożyć na trzy etapy:

1. stromy wzrost napięcia na zaciskach odgromnika zakończony zapłonem iskiernika wielokrotnego,
2. wzrost, kulminacja i zanik prądu wyładowczego.
3. gaszenie prądu następczego, tj. prądu podtrzymywanego przez napięcie robocze sieci.

W pierwszym etapie zachowanie odgromnika zależy wyłącznie od charakterystyki udarowej iskiernika. Stos zmiennooporowy, którego zadaniem jest obniżenie przepięcia do wartości niegroźnej dla chronionej izolacji, nie odgrywa w pierwszej fazie działania odgromnika żadnej roli. W procesie gaszenia łuku, po przeminięciu fali wędrownej, współdziałają obydwie elementy odgromnika. Stos zmiennooporowy ogranicza prąd następczy do wartości kilkudziesięciu amperów, natomiast iskiernik przerywa go.

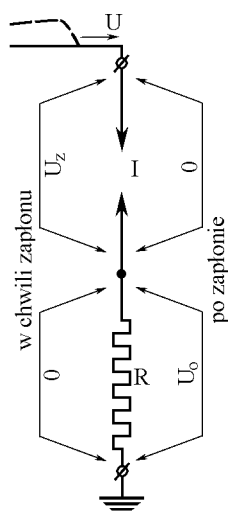
1.2.1 Iskiernik wielokrotny

Iskiernik spełnia w odgromniku zaworowym następujące zasadnicze funkcje:

1. odcina rezystor nieliniowy od przewodu fazowego w czasie normalnej pracy układu elektroenergetycznego,
2. załącza rezystor przy zaatakowaniu odgromnika falą wędrowną,
3. przerywa prąd następczy.

Iskiernik, aby należycie spełniał swe zadania, musi posiadać odpowiednie właściwości zapłonowe i gaszące. Jego wytrzymałość dla napięć przemiennych winna być odpowiednio wysoka. W żadnym przypadku nie powinien nastąpić zapłon iskiernika w czasie eksploatacji przy przepięciach wolnozmiennych; w

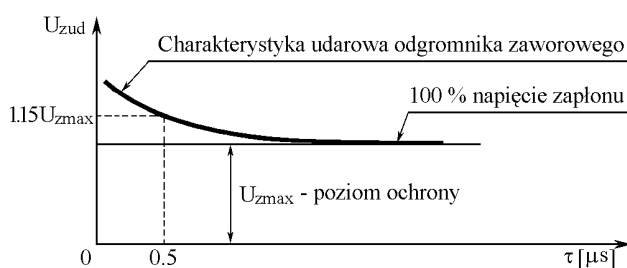




Rys. 8.1. Odgromnik zaworowy. Schemat ideowy i rozkład napięć na jego elementach podczas działania I – iskiernik wielokrotny, R – stos zmiennooporowy (SiC), U – napięcie udarowe, U_z – napięcie zapłonu, U_o – napięcie obniżone

przeciwnym bowiem razie ulegnie odgromnik zniszczeniu po co najwyżej kilku okresach działania napięcia przemiennego. Poza tym normalne odgromniki zaworowe nie są przystosowane do gaszenia łuku zasilanego przepięciami łączeniowymi, a ich stopy zmiennooporowe nie wytrzymują prądów długotrwałych, tj. rzędu milisekund, mimo iż bez uszkodzenia wytrzymują znaczne wartości prądów udarowych (przy długotrwałych prądach rezystory ulegają zniszczeniu na skutek przegrzania). Zatem odgromniki przystosowane do likwidowania przepięć udarowych muszą posiadać dostatecznie wysokie statyczne napięcie zapłonu (tj. napięcie o częstotliwości sieciowej), tak aby nie działały przy przepięciach wewnętrznych. W praktyce wartość statycznego napięcia zapłonu jest około $2 \cdot U_n$.

Z drugiej strony dla prawidłowej ochrony izolacji od przepięć atmosferycznych wytrzymałość udarowa iskiernika powinna być znacznie mniejsza od wytrzymałości udarowej chronionej izolacji. Tak więc z punktu widzenia skuteczności ochrony odgromnik winien odznaczać się stosunkowo niskim napięciem udarowym zapłonu. Ponadto charakterystyka udarowa iskiernika powinna być możliwie płaska, tak aby nawet przy udarach o bardzo stromym



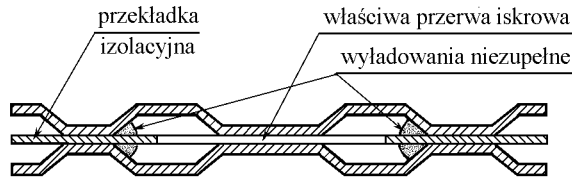
Rys. 8.2. Charakterystyka udarowa odgromnika zaworowego

czole, nie przecinała się z charakterystyką udarową izolacji chronionej, zwłaszcza z charakterystyką udarową transformatorów, które jak wiadomo, odznaczają się płaskimi charakterystykami.

Wymaga się, aby punkt charakterystyki udarowej

odgromnika, odpowiadający czasowi do zapłonu $0.5 \mu s$, leżał nie wyżej niż 15 % ponad poziom ochrony (rys.8.2).

Jak widać z powyższego, dobry odgromnik zaworowy powinien odznaczać się małym współczynnikiem uderu, tj. małą wartością stosunku uderowego napięcia zapłonu do statycznego napięcia zapłonu.



Rys. 8.3. Schemat elementu iskiernika wielokrotnego w odgromniku zaworowym

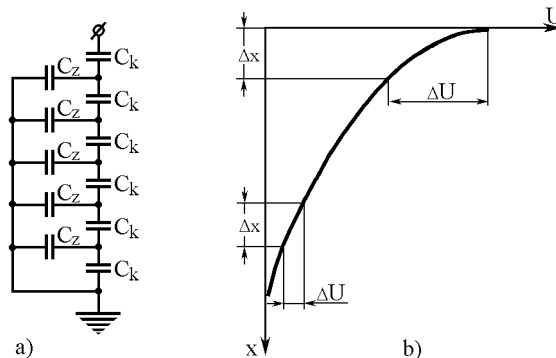
Płaski kształt charakterystyki uderowej, którym odznaczają się układy o równomiernym polu elektrostatycznym, osiąga się w odgromnikach przez odpowiednie ukształtowanie elektrod iskiernika (rys. 8.3).

Drogą do poprawienia własności zapłonowych iskiernika jest:

1. naświetlanie przerw iskrowych,
2. odpowiednie wysterowanie pojemnościowego rozkładu napięcia na iskiernikach.

Naświetlanie polega na wywołaniu wewnątrz iskiernika wyładowań niezupełnych już przy napięciach mniejszych od statycznego napięcia zapłonu. Wyładowania te muszą jednakże występować poza układem głównych elektrod, w przeciwnym bowiem razie układ nabrałby własności układu ostrzowego. Rola tych wyładowań jest w przybliżeniu taka, jak, np. lampy kwarcowej naświetlającej iskiernik. Na drodze fotojonizacji wytwarza się w przerwie znaczna liczba wolnych elektronów, wskutek czego czas do przeskoku ulega skróceniu, a rozrzut czasów do przeskoku zmniejszeniu.

Przed zapłonem iskiernika rozkład na poszczególnych przerwach iskrowych jest czysto pojemnościowy, podobnie jak np. wzdłuż łańcucha izolatorów (rys. 8.4). Rozkład ten jest krzywoliniowy, wskutek czego na zbliżone do zacisku liniowego przerwy iskrowe przypadają większe wartości napięcia niż na przerwy iskrowe znajdujące się w pobliżu części uziemionej.



Rys. 8.4. Iskiernik wielokrotny: a) schemat zastępczy, b) rozkład napięcia na iskierniku

Nierównomierny rozkład napięcia jest dla pracy odgromnika zaworowego niekorzystny, ponieważ prowadzi do tzw. przeskoku kaskadowego. Polega on na

powstaniu iskry najpierw w iskierniku najbliższym zaciskowi liniowemu, a całe napięcie odkłada się na pozostałych iskiernikach, następuje przeskok na kolejnym iskierniku itd. Prowadzi to do wydłużenia czasu do całkowitego przeskoku (w porównaniu z przypadkiem, w którym na wszystkich iskiernikach nastąpiłby równoczesny zapłon) i na obniżeniu statycznego napięcia zapłonu. Dlatego też dla wyrównania rozkładu napięcia stosuje się w odgromnikach zaworowych sterowanie pojemnościowe (ekran) względnie rezystancyjne (dzielnik rezystancyjny przyłączony do stosu iskiernikowego).

Charakterystyka udarowa współczesnych odgromników zaworowych jest niezależna od warunków atmosferycznych (hermetyczna obudowa) i mało zależy od biegunowości udaru ($\pm 5\%$).

Iskiernik odgromnika zaworowego, oprócz odpowiednich własności zapłonowych, musi posiadać zdolność przerywania prądu następczego, płynącego przez odgromnik pod wpływem napięcia o częstotliwości technicznej. Prąd następczy ograniczany jest przez nieliniowy rezystor, zwykle do wartości kilkudziesięciu lub kilkuset amperów, co ułatwia zgaszenie łuku w przerwie iskrowej. Podział iskiernika na wiele elementarnych przerw iskrowych powoduje podział łuku na szereg odcinków, przez co uzyskuje się intensywnie chłodzenie łuku, a zatem i łatwiejsze jego gaszenie.

Zwiększenie intensywności gaszenia łuku prądu następczego, a więc i zwiększenie działania ochronnego odgromnika można uzyskać przez wymuszenie ciągłego przesuwania się łuku po powierzchni elektrod iskiernika bądź rozciągnięcie łuku na znaczną długość. Powyższy efekt osiąga się za pomocą oddziaływania pola magnetycznego na łuk. Zasadę działania odgromnika z tak zwanym wydmuchem elektromagnetycznym przedstawia rys. 8.5.

1.2.2. Stos zmiennooporowy

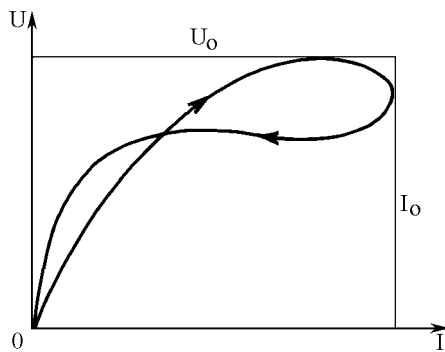
Prąd przepływający przez odgromnik wywołuje spadek napięcia na rezystancji stosu zmiennooporowego (tzw. napięcie obniżone). Z punktu widzenia ochrony odgromowej spadek napięcia przy przepływie prądu wyładowczego powinien być najmniejszy, co można uzyskać przy małej wartości rezystancji stosu. Z kolei dla ograniczenia prądu następczego do wartości, przy której może nastąpić zgaszenie łuku, stos powinien odznaczać się możliwie dużą wartością rezystancji. Dla zrealizowania powyższych wymagań stos posiada zmienną rezystancję, zależną od charakteru przepływającego prądu. Materiałem, z którego wykonany jest stos zmiennooporowy odgromnika zaworowego, jest karborund (SiC). Odznacza się on nieliniową charakterystyką napięciowo-prądową, która zależna jest zarówno od własności materiału, jak i od jego wymiarów.



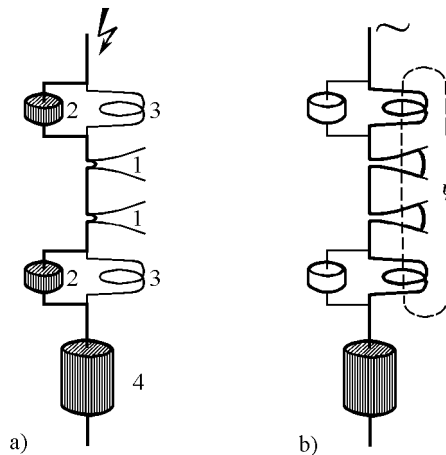
Zmiana rezystancji stosu powoduje, że spadek napięcia na nim nie jest proporcjonalny do przepływającego prądu; przy wzroście prądu spadek napięcia wzrasta mniej niż proporcjonalnie. Typowy przebieg zależności wartości chwilowej spadku napięcia na stosie od wartości przepływającego prądu pokazuje rys. 8.6.

W ochronie odgromowej dogodną podstawą do oceny własności ochronnych odgromnika zaworowego stanowi charakterystyka napięciowo-prądowa (rys. 8.7).

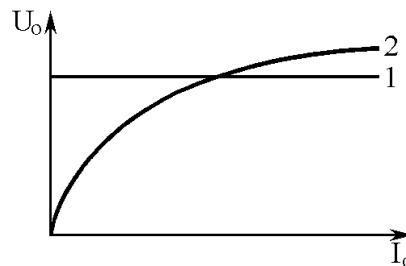
Z punktu widzenia ochrony najważniejsze są wartości szczytowe prądu wyładowczego oraz napięcia obniżonego. Jak widać z przebiegu napięciowo-prądowego (rys. 8.6), te dwie wartości nie występują jednocześnie; U_o wyprzedza na ogół I_o . Wybierając szereg par wartości maksymalnych napięć i prądów z oscylogramów uzyskanych dla różnych prądów wyładowczych, uzyskuje się charakterystykę napięciowo-prądową.



Rys. 8.6. Pętlica napięciowo-prądowa stosu zmiennoporowego
 U_o – napięcie obniżone, I_o – prąd wyładowczy



Rys. 8.5. Zasada działania odgromnika zaworowego z wydmuchem elektromagnetycznym: a) przy prądzie udarowym, b) przy prądzie o częstotliwości technicznej
1 – przerwy iskrowe, 2 – rezystory bocznikujące, 3 – elektromagnesy, 4 – stos zmiennoporowy



Rys. 8.7. Charakterystyka ochronna napięciowo-prądowa
1 – idealna, 2 – rzeczywista

Charakterystykę napięciowo-prądową odgromnika zaworowego można w przybliżeniu aproksymować według zależności:

$$U_o = C \cdot I_o^\alpha \quad (8.1)$$

gdzie: U_o – napięcie obniżone, I_o – prąd wyładowczy, C – stała zależna od wymiarów geometrycznych stosu, α – współczynnik zaworowości, zależny od własności materiału zmiennooporowego (dla SiC α zawiera się w granicach od 0.18 do 0.21). Odgromnik działa tym lepiej, im współczynnik α jest mniejszy; w idealnym przypadku (rys. 8.7) współczynnik α byłby równy 0.

Dla przybliżonego wyznaczenia wartości współczynnika zaworowości płytki zmiennooporowej wystarczy wyznaczyć tylko dwa punkty charakterystyki, np. dla znamionowej wartości prądu wyładowczego I_{on} i dla $\frac{1}{2} I_{on}$, co pozwoli na wyeliminowanie stałej C . Stąd mamy:

$$U_{on} = C \cdot I_{on}^\alpha \quad \text{oraz} \quad U_{o1} = C \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^\alpha I_{o1}^\alpha \quad (8.2)$$

Dzieląc stronami otrzymuje się:

$$\frac{U_{on}}{U_{o1}} = \left(\frac{1}{2}\right)^\alpha \quad \Rightarrow \quad \alpha = \frac{\ln \frac{U_{on}}{U_{o1}}}{\ln 2} \quad (8.3)$$

Mając kilka punktów charakterystyki można wyznaczyć dokładniej stałą α odgromnika zaworowego metodą graficzną. W tym celu wygodniej jest nanieść punkty pomiarowe na siatkę wykresu we współrzędnych $\frac{I_o}{I_{on}}$ oraz $\frac{U_o}{U_{on}}$ w skali logarytmicznej i przez te punkty poprowadzić najlepiej pasującą do nich prostą. Zależność $\lg \frac{U_o}{U_{on}} = f(\lg \frac{I_o}{I_{on}})$ powinna być (zgodnie z równaniem charakterystyk) linią prostą korzystając z reguły najmniejszych kwadratów. Tangens kąta nachylenia owej prostej jest równy liczbowo współczynnikowi zaworowości:

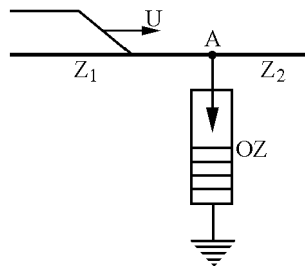
$$\alpha = \arctg \frac{y}{x}.$$


1.2.3. Działanie ochronne odgromnika zaworowego

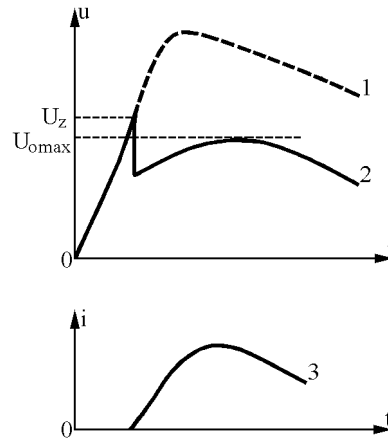
Działanie ochronne odgromnika zaworowego można przedstawić za pomocą oscylogramów (rys. 8.8).

Krzywa 1 (rys. 8.8) przedstawia przebieg napięcia udarowego atakującego odgromnik, krzywa 2 pokazuje przebieg napięcia po zadziałaniu odgromnika, a krzywa 3 – przebieg prądu wyładowczego. Mając oscylogram napięcia wykonany przy przepływie znamionowego prądu wyładowczego przez odgromnik, można łatwo określić największą wartość napięcia na zaciskach, którą jest jedna z dwóch wielkości U_z lub U_{omax} .

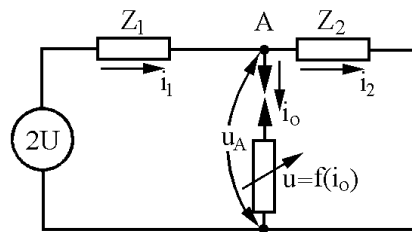
Przebieg napięcia na odgromniku można wyznaczyć również na drodze obliczeniowej w sposób graficzny. Rozpatrzmy w tym celu układ podany na rys. 8.9, odpowiadający przypadkowi zainstalowania odgromnika na końcu otwartej linii.



Rys. 8.9. Schemat ideowy odgromnika zainstalowanego na końcu linii;
 $Z_1 = 400 \, \Omega$, $Z_2 = \infty$



Rys. 8.8. Oscylogram napięcia i prądu udarowego odgromnik zaworowego



Rys. 8.10. Schemat zastępczy Petersena

Do odgromnika OZ przychodzi fala o wartości szczytowej U i kształcie jak na rys. 8.9. Posługując się schematem zastępczym Petersena (rys. 8.10) można napisać następujący układ równań:

$$u_o = ku - \frac{k}{2}i_o Z_1 \quad (8.4)$$

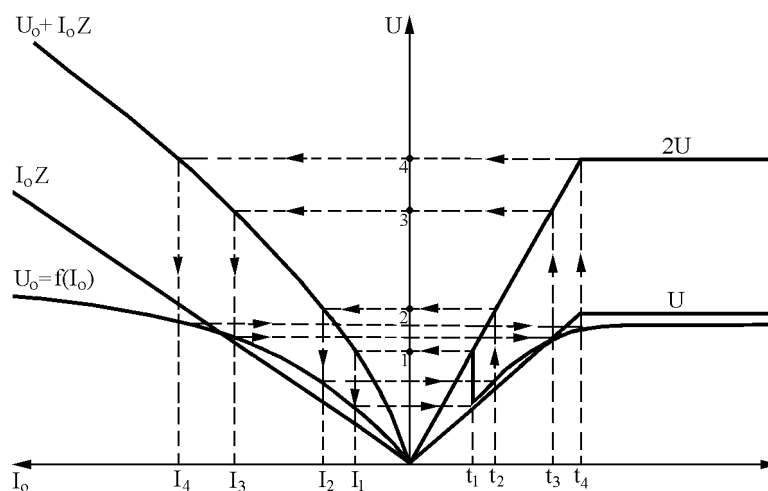
$$u_o = Ci_o^\alpha \quad (8.5)$$

gdzie:

$$k = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Dla $Z_2 = \infty$, $k = 2$
$$i_o = \frac{2u - u_o}{Z_1} \quad (8.6)$$

Powyższy układ równań najprościej jest rozwiązać metodą graficzną, przedstawioną na rys. 8.11.



Rys. 8.11. Graficzna konstrukcja zmian napięcia w czasie na zaciskach odgromnika zaworowego dla przypadku podanego na rys. 8.9.

Po osiągnięciu na zaciskach odgromnika wartości napięcia odpowiadającej napięciu zapłonu, odgromnik zaczyna działać (chwila czasowa t_1). Po zadziałaniu, napięcie na jego zaciskach będzie równe spadkowi napięcia na stosie zmienneoporowym, odpowiadającego prądowi wyładowczemu I_1 (rys. 8.11 – punkt 1). Kolejno obieramy teraz dowolne punkty – 2, 3, 4,... na osi rzędnych; określamy z krzywej $U_o + I_o Z = f(I_o)$ odpowiadające tym napięciom prądy $I_2, I_3, I_4, \dots$ i spadki napięcia U_o . Kierunek operacji dla poszczególnych punktów pokazują strzałki.

1.2.4. Napięcie znamionowe odgromnika zaworowego

Napięciem znamionowym urządzenia nazywa się napięcie, na które urządzenie zostało zbudowane i oznaczone. W przypadku odgromnika zaworowego jest ono równe najwyższemu napięciu robocznemu sieci (U_m – najwyższa dopuszczalna wartość skuteczna napięcia roboczego o częstotliwości 50 Hz, która może być doprowadzona na stałe do zacisków odgromnika i przy której zapewnione jest prawidłowe jego działanie).

Określenie napięcia znamionowego odgromnika zaworowego przy doborze do ochrony urządzeń oparte jest na założeniach podanych poniżej. Napięcie znamionowe odgromnika jest określone jako napięcie przemienne, przy którym istnieje gwarancja niezawodnego zgaszenia łuku zasilanego prądem następczym. Aby zachowana była dostateczna pewność ciągłości ruchu, wytwórca odgromnika musi spełnić warunek:

$$U_{\text{nodgr.}} \leq \frac{U_g}{1.1 \div 1.15} \quad (8.7)$$

gdzie: U_g – napięcie gaszenia (wartość napięcia przy której nie nastąpi ponowny zapłon odgromnika).

Napięcie znamionowe odgromnika musi być co najmniej równe najwyższemu napięciu sieci względem ziemi (odgromniki zaworowe przeznaczone do ochrony od przepięć atmosferycznych są włączane zawsze pomiędzy przewód fazowy a ziemię). Zatem musi być spełniony również warunek:

$$U_{\text{nodgr.}} \geq k_z U_m \quad (8.8)$$

gdzie: k_z – współczynnik skuteczności uziemienia punktu zerowego sieci.

Tak więc o wyborze napięcia znamionowego odgromnika zaworowego decydują: najwyższe napięcie robocze sieci U_m i sposób uziemienia punktu zerowego. Przy idealnym (bezoporowym) uziemieniu sieci oraz odgromnika nie mogłoby wystąpić na odgromniku napięcie większe niż $U_m / \sqrt{3} = 0.58 U_m$; wartość ta w praktyce jest nieosiągalna. W sieciach najwyższych napięć na ogół $U_{\text{nodgr.}} = 0.75 U_m$. Ponieważ nie można dobierać napięcia znamionowego odgromnika dla każdej sieci według stosunku $\frac{U_{\text{nodgr.}}}{U_m}$, rozróżnia się tylko odgromniki 75 %, 80 % i 100 % ($U_n = 0.75 U_m$, $U_n = 0.8 U_m$ i $U_n = U_m$); np. dla sieci 220 kV o dopuszczalnym wzroście napięcia do 245 kV można stosować odgromnik $0.75 \cdot 254 =$



184 kV, jeśli punkt zerowy jest skutecznie uziemiony, lub $1.0 \cdot 245 = 245$ kV przy niespełnieniu tego warunku.

1.2.5. Poziom ochrony odgromnika zaworowego

Poziom ochrony zdefiniowany jest jako: najwyższa wartość szczytowa napięcia na zaciskach odgromnika zaworowego, która nie powinna być przekroczona przy doprowadzeniu do zacisków odgromnika w określonych warunkach i układach probierczych uderów piorunowych (łączeniowych) o znormalizowanym kształcie i wartości szczytowej.

Dla przepięć piorunowych za poziom ochrony (U_{op}) przyjmuje się największa z trzech wartości napięć:

1. napięcie zapłonu przy udarze normalnym,
2. napięcie obniżone przy znamionowym prądzie wyładowczym,
3. napięcie zapłonu przy udarze ukośnym, podzielone przez 1.15.

W eksploatacji poziom ochrony odgromnika zaworowego dla przepięć piorunowych powinien spełniać warunek:

$$U_{op} \leq \frac{U_{ip}}{k_{bp}} \quad (8.9)$$

gdzie: U_{ip} – znamionowe napięcie probiercze uderowe piorunowe izolacji chronionych urządzeń,

k_{bp} – współczynnik bezpieczeństwa dla przepięć piorunowych.

Minimalna wartość współczynnika bezpieczeństwa dla przepięć piorunowych wynosi $k_{bp}=1.3$.

Za poziom ochrony dla przepięć łączeniowych (U_{ow}) przyjmuje się największą wartość napięcia zapłonu przy uderach łączeniowych.

W eksploatacji poziom ochrony odgromnika zaworowego dla przepięć łączeniowych powinien spełniać warunek:

$$U_{ow} \leq \frac{U_{iw}}{k_{bw}} \quad (8.10)$$

gdzie: U_{iw} – znamionowe napięcie probiercze uderowe łączeniowe izolacji chronionych urządzeń,

k_{bw} – współczynnik bezpieczeństwa dla przepięć łączeniowych.

Minimalna wartość współczynnika bezpieczeństwa dla przepięć łączeniowych powinna wynosić $k_{bw}=1.15$.



1.2.6. Próby profilaktyczne odgromnika zaworowego

Odgromniki zaworowe w czasie eksploatacji mogą zmieniać swe własności oraz mogą ulegać różnego rodzaju uszkodzeniom. Muszą zatem być poddawane okresowym przeglądom i badaniom. W "Instrukcji eksploatacji odgromników" rozróżnia się następujące rodzaje badań odgromnika:

- profilaktyczne,
- poawaryjne,
- specjalne.

Zgodnie z instrukcją próby profilaktyczne przeprowadzane powinny być w odstępach czasu nie przekraczających 5 lat i obejmują:

- oględziny zewnętrzne w stanie beznapięciowym,
- pomiar rezystancji izolacji megomierzem,
- pomiar statycznego napięcia zapłonu,
- pomiar prądu przewodnościowego (prądu upływu).

Próby poawaryjne i specjalne wykonywane są w zakresie zależnym od potrzeb i program ich ustalany jest indywidualnie.

Oględziny zewnętrzne mają na celu stwierdzenie, czy na odgromniku nie widać śladów świadczących o jego uszkodzeniu, np. w postaci śladów wyładowań, pęknięć lub stłuczonych kloszy obudowy porcelanowej, skorodowanych części metalowych, uszkodzonych membran przeciwwybuchowych itp.

Pomiar statycznego napięcia zapłonu podczas prób profilaktycznych ma na celu ocenę stanu iskiernika. Po wielokrotnym zadziałaniu, w czasie którego płyną duże prądy udarowe, jak również prądy następcze, elektrody iskiernika mogą się nadtopić. Powstają na nich tzw. naperlenia, które zmniejszają odstęp między elektrodami, a tym samym zmniejszają wartość napięcia zapłonu. Ponadto pomiar stycznego napięcia zapłonu może dać odpowiedź dotyczącą stanu wnętrza odgromnika. Wzrost wartości napięcia zapłonu świadczy o zawilgoceniu odgromnika.

Pomiar rezystancji izolacji i prądu upływu odgromnika zaworowego pozwala wnioskować, czy zachodzą w nim zmiany powodujące pogorszenie się stanu izolacji. Prąd upływu odgromników zaworowych bez sterowania rezystancyjnego nie przekracza zwykle $0.2 \mu\text{A}$. Wartość prądu upływu większa od $0.5 \mu\text{A}$ jest oznaką złego stanu wnętrza odgromnika. Dlatego odgromniki, w których prąd upływu przekracza tę wartość, są usuwane z eksploatacji. W odgromnikach ze sterowaniem rezystancyjnym wartości prądu upływu są znacznie większe (rzędu mA) i jedynym sposobem wykrycia uszkodzenia jest porównanie wartości prądu upływu pomierzonej z wartością podaną przez producenta.



Porównanie wyników prób profilaktycznych z wymaganiami "Instrukcji eksploatacji odgromników" oraz ich zmian między kolejnymi badaniami okresowymi pozwala ustalić przydatność odgromników do dalszej eksploatacji.

1.3. Odgromnik beziskiernikowy

1.3.1. Budowa i zasada działania

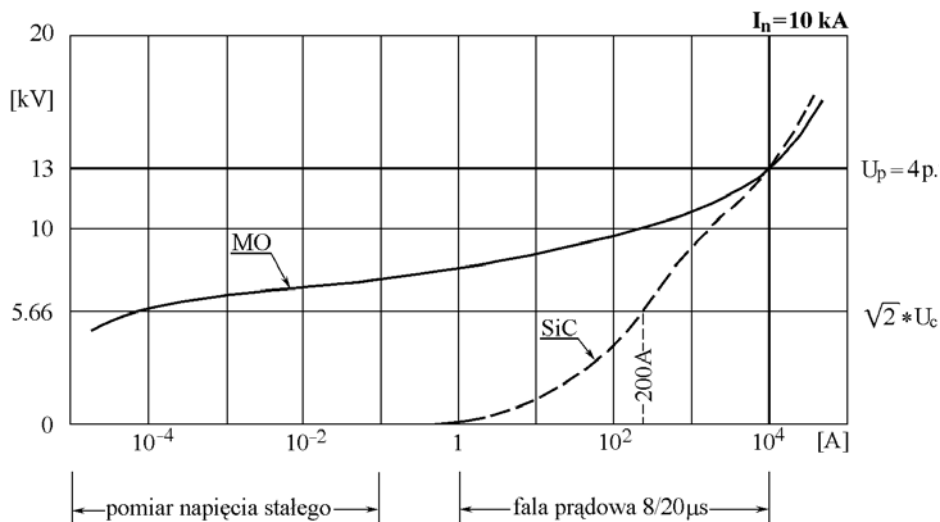
Budowa i zasada działania odgromnika beziskiernikowego jest niezwykle prosta. Jedynym, czynnym pod względem elektrycznym, elementem odgromnika jest stos szeregowo połączonych warystorów, wykonanych technologią ceramiczną z tlenku cynku (ZnO) z dodatkiem tlenków innych metali, które precyzyjnie dozowane kształtują i stabilizują charakterystykę napięciowo-prądową warystorów. Część aktywną odgromnika MO stanowi kolumna stosu rezystorów zmienneoporowych o kształcie cylindrycznym. Liczba rezystorów w stosie uzależniona jest od napięcia U_c odgromnika. Odgromniki te mogą być wykonywane w obudowach z różnych materiałów, np. podobnie jak odgromniki zaworowe iskiernikowe w obudowach porcelanowych, ale także w obudowach polimerowych oraz z żywic syntetycznych. W warunkach środowiskowych bardzo dobre własności eksploatacyjne wykazują obudowy silikonowo-polimerowe (znacznie przewyższają obudowy porcelanowe). W tym wykonaniu konstrukcja odgromnika jest bardzo prosta – jest to stos warystorów bezpośrednio zalany w tworzywie silikonowym z wyprowadzonymi na zewnątrz zaciskami. Zróżnicowana średnica warystorów pozwala na produkcję odgromników MO o różnych poziomach ochrony oraz o różnych zdolnościach absorpcji energii w zakresie wyładowczych prądów piorunowych oraz energii związanej z przepięciami wewnętrznymi w zależności od przeznaczenia odgromnika. Odgromniki MO w wyglądzie niczym nie różnią się od odgromników zaworowych iskiernikowych, jedynie ich gabaryty dla tych samych napięć znamionowych są mniejsze. Zaletą odgromników beziskiernikowych jest ich większa odporność na wpływy warunków środowiskowych. Koszt odgromnika MO jest niższy od kosztu klasycznego odgromnika zaworowego, ze względu na brak iskiernika wielokrotnego.

Podstawowa różnica między poprzednią generacją ograniczników przepięć, określanych często jako „konwencjonalne”, zawierających iskierniki i warystory z SiC polega na tym że bloki warystorów z ZnO cechują się znacznie większą nieliniowością charakterystyki prądowo- napięciowej niż warystory z SiC i dzięki temu mogą być włączone w sposób ciągły bezpośrednio (z wyeliminowaniem iskiernika) pod napięcie robocze sieci zarówno podczas ograniczania przepięć jak i w warunkach normalnej pracy. Fakt ten powoduje że odgromnik MO reaguje



je na każdą zmianę napięcia na swoich zaciskach, podczas gdy odgromnik zaworowy iskiernikowy dopiero w chwili zapłonu iskiernika staje się aktywny w procesie ograniczania przepięcia. Dlatego też odgromniki beziskiernikowe znacznie przewyższają skutecznością ochrony tradycyjne odgromniki iskiernikowe SiC a także odgromniki iskiernikowe z warystormi ZnO.

Charakterystyka prądowo- napięciowa $U = f(I)$ warystorów ZnO jest zbliżona do idealnej charakterystyki zaworowej (współczynnik zaworowości $\alpha \approx 0.04$). Na rys. 8.12 pokazano przykładowo charakterystykę prądowo-napięciową dla pojedynczego rezystora ZnO o napięciu trwałej pracy $U_c = 4$ kV oraz dla porównania charakterystykę rezystora SiC. Jak wynika z rysunku, dla rezystora ZnO przy napięciu stałym o wartości $\sqrt{2} U_c = 5.66$ kV przepływa prąd stały 0.1 mA. Składowa pojemnościowa przy częstotliwości 50 Hz i takiej samej wartości U_c wynosi około 0.5 mA. Poziom ochrony U_p dla $I_n = 10$ kA wynosi 13 kV. Natomiast dla rezystora SiC, odznaczającego się znacznie mniejszą nieliniowością charakterystyki, prąd ciągły takiego odgromnika bez iskierników wynosi około 200 A. Ze względów termicznych zastosowanie takiego odgromnika w praktyce jest niemożliwe. W konsekwencji stos rezystorów SiC musi być połączony szeregowo z iskiernikiem, który powoduje jego odcięcie od sieci w czasie normalnej pracy.



Rys. 8.12. Charakterystyka prądowo-napięciowa rezystorów MO oraz SiC dla $U_c = 4$ kV w skali półlogarytmicznej

Zasada działania odgromnika MO (bez iskiernika) jest prosta. Wysoko nieliniowa charakterystyka prądowo-napięciowa warystorów powoduje, że przez

włączony pod napięcie odgromnik, płynie bardzo mały (rzędu kilkuset mikroamperów) prąd o charakterze pojemnościowym. Gdy na zaciskach odgromnika pojawi się przepięcie, płynący przez niego prąd wzrasta w sposób ciągły bez opóźnienia, zgodnie z pokazaną na rys. 8.12 charakterystyką, tzn. nie występuje specyficzny stan oddzielający skrajne wartości rezystancji odgromnika. Odgromnik przechodzi w stan przewodzenia w sposób ciągły. Po zaniku przepięcia prąd ponownie zanika wg charakterystyki. W ten sposób, w odróżnieniu do odgromników z iskiernikami nie występuje przeskok iskry, a po zaniku prądu wyładowczego nie rejestruje się prądu następczego.

1.3.2. Podstawowe parametry odgromników MO

Aby odgromnik beziskiernikowy pracował niezawodnie w czasie normalnej pracy i ograniczał wzrosty napięcia podczas operacji łączeniowych i przepięć atmosferycznych musi posiadać szereg właściwości, które charakteryzowane są jego parametrami. Podstawowymi parametrami, które należy brać pod uwagę przy wyborze tych odgromników do warunków pracy występujących w układzie elektroenergetycznym, są:

1. napięcie ciągłej pracy U_c ,
2. napięcie znamionowe U_n ,
3. znamionowy prąd wyładowczy I_n ,
4. graniczny prąd wyładowczy,
5. trwały prąd odgromnika I_c ,
6. poziom ochrony od przepięć piorunowych U_p i przepięć łączeniowych U_w ,
7. zdolność pochłaniania energii E ,
8. wytrzymałość odgromnika na przepięcia wolnozmiennne T ,
9. wytrzymałość zwarciowa,
10. odporność na zabrudzenia powierzchniowe.

Jednym z najważniejszych parametrów odgromnika MO jest napięcie trwałej pracy. **Napięcie trwałej pracy odgromnika beziskiernikowego (U_c)** jest to najwyższa wartość skuteczna napięcia przemiennego o częstotliwości sieciowej które może być trwale doprowadzone do zacisków odgromnika.

Napięcie znamionowe odgromnika beziskiernikowego U_n jest umowną wartością napięcia probierczego stosowanego w próbie działania odgromnika. Napięcie to nie może być doprowadzone do odgromnika trwale w warunkach eksploatacji. Zgodnie z normami IEC 99-4 i PN/IEC 99-4 jest to wartość napięcia przemiennego jaką odgromnik musi wytrzymać w ciągu 10 sekund po uprzednim ogrzaniu go do temperatury 60 °C i doprowadzeniu do niego energii



wynikającej z wymagań normy odnośnie próby działania (udary prądowe graniczne i udary prądowe łączeniowe).

W odróżnieniu od powyższego - **napięcie znamionowe odgromnika iskiernikowego** jest najwyższą wartością napięcia przemiennego przy której ogranicznik zapewnia w pełni poprawne działanie i może być doprowadzone trwale do zaciśków odgromnika, jednak w warunkach eksploatacji wartość ta nie może być przekroczona nawet przez bardzo krótki okres czasu.

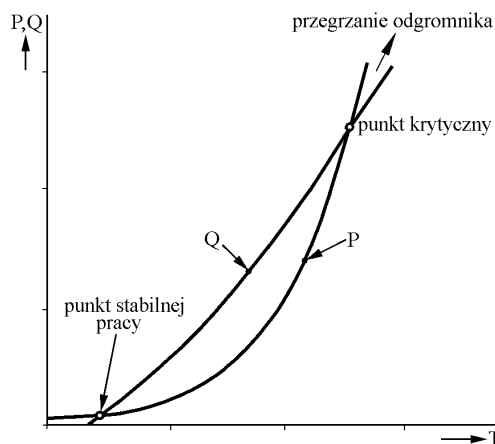
Znamionowy prąd wyładowczy I_n - jest to wartość szczytowa udaru prądowego o kształcie 8/20 przy którym określony jest piorunowy poziom ochrony odgromnika.

Graniczny prąd wyładowczy - jest to wartość szczytowa piorunowego prądu wyładowczego o kształcie 4/10 który jest stosowany do sprawdzenia odporności odgromnika na narażenia związane z bliskim lub bezpośrednim uderzeniem pioruna.

Trwały prąd odgromnika I_c - jest to składowa czynna prądu płynącego przez odgromnik pod wpływem napięcia trwałej pracy U_c .

Piorunowy poziom ochrony U_p - jest to maksymalna wartość napięcia na stosie zmiennooporowym podczas przepływu prądu wyładowczego o wartości znamionowej I_n . Jest to podstawowy parametr stanowiący o skuteczności ochrony.

Zdolność pochłaniania energii E - jest to maksymalna wartość energii wyrażona w kJ, którą odgromnik jest zdolny zaabsorbować przy przepływie przez niego jednorazowego impulsu prądowego bez "rozbiegania cieplnego odgromnika". Doprowadzenie energii do odgromnika powoduje wzrost temperatury warystorów. Na rys. 8.13 pokazana jest charakterystyka strat mocy (krzywa P) w rezystorach MO znajdujących się pod napięciem U_c . Jak widać krzywa strat mocy rośnie wykładniczo wraz ze wzrostem temperatury. Jeżeli wartość tej mocy jest większa od mocy odprowadzanej na zewnątrz (chłodzenie - krzywa Q), następuje ciągły wzrost temperatury warystorów i po osiągnięciu punktu



Rys. 8.13. Charakterystyki obrazujące straty mocy P oraz przepływ ciepła Q od aktywnych części odgromnika MO do otoczenia w funkcji ich temperatury T przy napięciu ciągłej pracy U_c

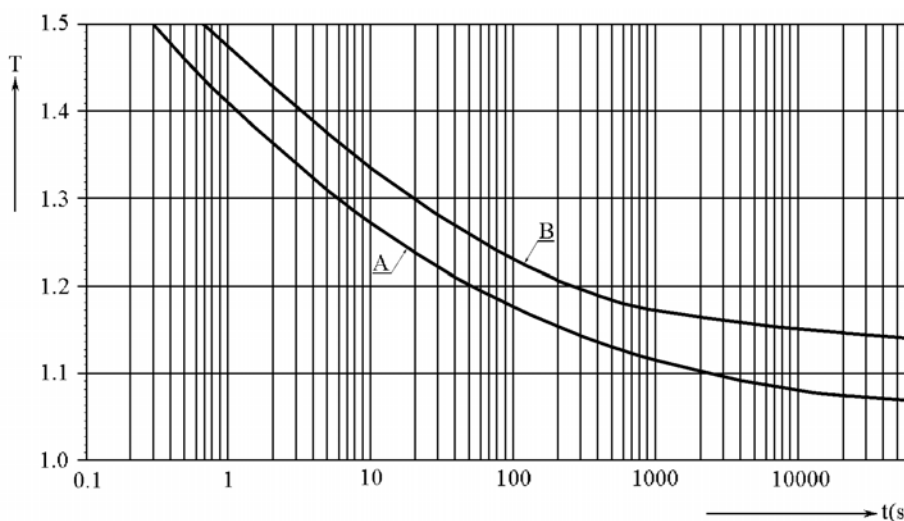


krytycznego następuje tzw. "rozbieganie cieplne odgromnika", a w efekcie jego termiczne zniszczenie. W katalogach fabrycznych zdolność pochłaniania energii przez odgromnik podawana jest w kJ odniesionych do 1 kV napięcia znamionowego U_n (np. $2.5 \text{ kJ}/1\text{kV} \cdot U_n$).

Wytrzymałość odgromnika MO na przepięcia wolnozmiennie T – określona jest współczynnikiem T będącym krotnością napięcia trwałej pracy U_c .

$$T(t) = \frac{U_{TOV}}{U_c} \quad (11)$$

gdzie: U_{TOV} – przepięcie wolnozmiennie (**TOV –temporary overvoltage**),
 U_c – napięcie trwałej pracy odgromnika.



Rys. 8.14. Przykładowe charakterystyki współczynnika $T(t)$ w odniesieniu do przepięć wolnozmiennych U_{TOV} w funkcji czasu ich trwania t przy temperaturze otoczenia 45°C . Krzywa A dotyczy odgromników wstępnie obciążonych energią E, krzywa B odgromników bez obciążenia wstępnego. t – czas trwania przepięcia o częstotliwości sieciowej

W odgromnikach MO ze względu na ekstremalnie wysoką nieliniowość charakterystyki prądowo-napięciowej prąd następczy nie występuje, tak jak to ma miejsce w odgromnikach SiC. Z tego powodu odgromniki MO mogą wytrzymywać wzrost napięcia o częstotliwości sieciowej przez dłuższy okres czasu. Na rys. 8.14 pokazana jest przykładowa charakterystyka napięciowo-czasowa wartości przepięcia wolnozmiennego (TOV) jakie może być doprowadzone do

zacisków odgromnika w określonym czasie t (krzywa B). Jeżeli odgromnik, bezpośrednio przed wystąpieniem przepięcia, był poddany narażeniom powodującym wydzielanie się w nim energii (np. przepływ prądu wyładowczego) jego wytrzymałość na działanie przepięć wolnozmiennych jest mniejsza (krzywa A). Wytrzymałość odgromnika MO maleje ze wzrostem temperatury warystorów, zatem również temperatura otoczenia ma wpływ na wytrzymałość odgromnika na przepięcia wolnozmiennie. Np. jeżeli na odgromniku wystąpi przepięcie o wartości $1.2 \cdot U_c$ odgromnik wytrzyma to przepięcie w ciągu 150 s (krzywa B). Natomiast, jeżeli bezpośrednio przed wystąpieniem przepięcia została w odgromniku wydzielona energia, będzie on mógł wytrzymać to przepięcie tylko przez 50 s (krzywa A).

UWAGA: Przy rzeczywistym doborze odgromników należy korzystać z charakterystyk podawanych w katalogach fabrycznych dla konkretnego odgromnika.

Wytrzymałość zwarciova odgromnika – jest to najwyższa wartość prądu zwarcia sieci w miejscu zainstalowania odgromnika, którą uszkodzony odgromnik wytrzymuje bez wybuchowego rozerwania obudowy.

1.3.3. Dobór odgromnika beziskiernikowego

Właściwy dobór odgromnika, o parametrach dostosowanych do miejsca i warunków pracy decyduje w dużej mierze o skuteczności ochronny oraz o trwałości odgromnika. Wybór odgromnika należy poprzedzić zebraniem kompletnych i wiarygodnych informacji dotyczących:

1. sieci elektroenergetycznej w której ma być zainstalowany odgromnik,
2. warunków pracy przewidywanych w miejscu zainstalowania odgromnika,
3. obiektów chronionych.

Prawidłowy dobór odgromnika ma na celu zarówno zapewnienie optymalnych warunków ochrony izolacji obiektów chronionych oraz zabezpieczenie samego odgromnika przed zniszczeniem i polega na określeniu:

1. napięcia trwałej pracy,
2. znamionowego prądu wyładowczego,
3. zdolności pochłaniania energii,
4. wytrzymałości zwarciovej.

Najważniejszym parametrem odgromnika MO jest napięcie trwałej pracy U_c . Z tym napięciem wiążą się inne parametry, a głównie gwarantowany poziom ochrony. Aby odgromnik sprostał stawianym przed nim wymaganiom, napięcie U_c musi spełniać dwa podstawowe warunki:



1. musi być wyższe niż ciągłe napięcie o częstotliwości sieciowej na zaciskach odgromnika,
2. $T \cdot U_c$ musi być wyższe niż przepięcia wolnozmiennne, które mogą pojawić się na zaciskach odgromnika.

Zgodnie z rys. 8.14 przy doborze współczynnika T należy brać pod uwagę czas trwania przepięcia wolnozmiennnego t . Z powodów bezpieczeństwa z reguły wykorzystuje się krzywą A (ze wstępnym obciążeniem odgromnika energią).

W sieci trójfazowej odgromniki mogą być włączone pomiędzy: przewód fazowy i ziemię, punkt gwiazdowy transformatora i ziemię oraz pomiędzy przewody fazowe. Maksymalne napięcie na zaciskach odgromnika można określić biorąc za podstawę najwyższe dopuszczalne napięcie robocze sieci U_m lub zainstalowanych urządzeń elektrycznych (U_m - wartość skuteczna napięcia międzyfazowego). W sieciach trójfazowych szczególną uwagę należy zwrócić na przepięcia wolnozmiennne U_{TOV} . Pojawiają się one podczas zwarć doziemnych, a ich wartość zależy od sposobu uziemienia punktu gwiazdowego transformatora. Istotne znaczenie ma też konfiguracja i sposób sterowania układem elektroenergetycznym, ponieważ od tych czynników zależy czas trwania przepięć, a co za tym idzie wartość współczynnika $T(t)$ i w konsekwencji napięcie trwałej pracy odgromnika U_c . Musi być spełniony warunek:

$$U_c \geq \frac{U_{TOV}}{T(t)} \quad (8.12)$$

1.3.4. Przykład doboru napięcia U_c

W sieci z izolowanym punktem zerowym lub kompensacją ziemnozwarciową w warunkach zwarcia doziemnego napięcie na fazach zdrowych wzrasta do wartości U_m , zatem dla odgromnika MO zainstalowanego pomiędzy przewodem fazowym a ziemią $U_c \geq U_m$, natomiast dla odgromnika zainstalowanego do ochrony punktu gwiazdowego transformatora, gdzie napięcie może osiągnąć wartość $U_m / \sqrt{3}$ napięcie odgromnika powinno spełniać warunek:

$$U_c \geq \frac{U_m}{\sqrt{3}}. \quad (8.13)$$

W sieci z izolowanym punktem zerowym i automatyczną eliminacją zwarć doziemnych (poprzez zadziałanie zabezpieczeń ziemnozwarciowych) przepięcia osiągają takie same wartości jak wyżej, jednakże szybka likwidacja zwarcia po-



zwala na obniżenie wartości napięcia U_c poprzez dobór odpowiedniego współczynnika $T(t)$. W takiej sytuacji dla odgromnika zainstalowanego pomiędzy fazą i ziemią:

$$U_c \geq \frac{U_m}{T(t)} \quad (8.14)$$

a dla odgromnika do ochrony punktu gwiazdowego:

$$U_c \geq \frac{U_m}{T(t) \cdot \sqrt{3}}. \quad (8.15)$$

W sieciach ze skutecznie uziemionym punktem gwiazdowym transformatora przy wyborze napięcia U_c dla odgromnika do ochrony izolacji fazowej należy uwzględnić współczynnik skuteczności uziemienia, zatem:

$$U_c \geq k_z U_m \quad (8.16)$$

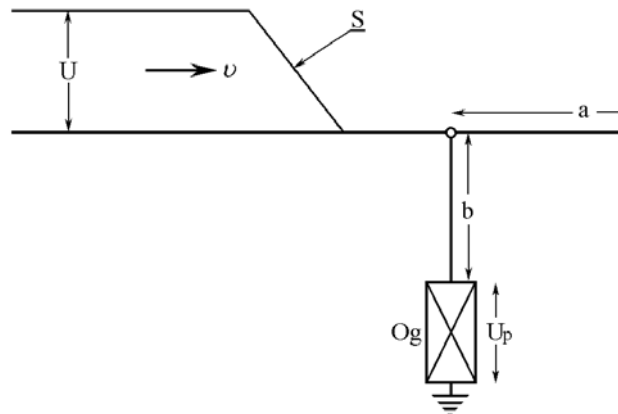
W sieciach w których występują wyższe harmoniczne możliwy jest wzrost napięcia powyżej U_m . Jeżeli wzrost ten nie przekracza 5 %, to napięcie U_c należy podwyższyć do wartości nie większej niż $1.05U_m / \sqrt{3}$ dla odgromników zainstalowanych między fazą a ziemią i do $1.05U_m$ dla odgromników włączonych między fazy. Jeżeli z powodu drgań harmoniczných wzrost napięcia jest większy niż 5 % dobór U_c należy uzgodnić z producentem odgromników.

1.3.5. Strefa ochronna odgromników

Skuteczność ochrony urządzeń zależy od poziomu ochrony odgromnika, marginesu koordynacyjnego (różnica pomiędzy U_{iz} i U_p) oraz w dużym stopniu od lokalizacji odgromnika względem chronionego obiektu. Optymalnym rozwiązaniem byłoby przyłączenie odgromnika bezpośrednio na zaciski urządzenia. Odgromniki są jednak zawsze instalowane w pewnej odległości od obiektów chronionych. Odległość L zainstalowania odgromnika od obiektu, np. transformatora, ma wpływ na zwiększenie przepięcia na zaciskach obiektu w stosunku do piorunowego poziomu ochrony odgromnika na skutek przebiegów falowych na przyłączach. Ten wzrost przepięcia zależy nie tylko od długości przyłączy ale także od stromości fali przepięciowej. Przez strefę ochronną L rozumie się największą odległość pomiędzy odgromnikiem i urządzeniem chronionym, która zapewnia wystarczający poziom jego ochrony. Istnieje wiele metod obliczania



dopuszczalnych odległości L . Metody te wymagają znajomości przebiegów czasowych przebiegów i szeregu parametrów układu sieciowego, są kłopotliwe w zastosowaniu i na ogół w praktyce nie korzysta się z nich.



Rys. 8,15. Schemat zastępczy układu do wyznaczenia zasięgu strefy ochronnej

W przybliżony sposób można oszacować zasięg strefy ochronnej na podstawie następującego teoretycznego modelu (rys. 8.15):

Na rys. 8.15 pokazano linię napowietrzną po której porusza się fala napięciowa U z prędkością v o stromości S w kierunku otwartego końca linii A. Gdy fala osiągnie punkt A ulegnie odbiciu i podwoi swoją wartość ($2U$). Aby zapobiec nadmiernym przepięciom zainstalowano odgromnik Og w odległości a od końca. Przyjmując upraszczające założenie, że stromość fali S nie zmienia się w czasie, maksymalną wartość napięcia U_A można określić jako:

$$U_A = U_p + \frac{2S}{v} \cdot (a + b) \quad (8.17)$$

Aby nie było przeskoku wartość napięcia U_A nie może przekroczyć wytrzymałości izolacji U_{iz} . Zatem, po przekształceniu powyższego wzoru otrzymuje się:

$$L \leq \frac{v}{2S} \cdot m \quad (8.18)$$

gdzie: $L = a + b$ – zasięg strefy w m,

v - prędkość rozchodzenia się fali napięciowej (w linii napowietrznej 300 m/ μ s),

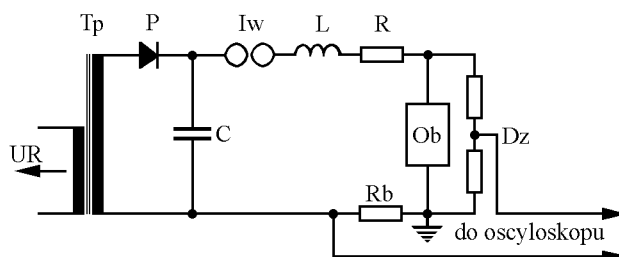
S - stromość fali w kV/ μ s,

$m = U_{iz} - U_p$ - margines koordynacyjny w kV.

2. POMIARY

2.1. Wyznaczenie charakterystyki prądowo-napięciowej

Schemat połączeń



Rys. 8.16. Schemat układu pomiarowego do zdejmowania charakterystyki prądowo-napięciowej i do pomiaru napięcia obniżonego odgromnika.

UR – układ regulacji napięcia, Tp – transformator probierczy (50000/220 V), P – prostownik, C – bateria kondensatorów, Iw – iskiernik włączający, L, R – indukcyjność i rezystancja generatora prądowego, Rb – bocznic do pomiaru prądu udarowego, Dz – dzielnik napięcia, Ob. – odgromnik lub stos zmiennooporowy

Sposób wykonania pomiaru

W praktyce dla wyznaczenia charakterystyki prądowo-napięciowej stosu zmiennooporowego oraz do pomiaru napięcia obniżonego odgromnika stosuje się oscyloskopy. Pomiar polega na oscylografowaniu przebiegu napięcia na stosie zmiennooporowym lub odgromniku w funkcji prądu wyładowczego lub w funkcji czasu, podczas przepływu przez odgromnik prądu wyładowczego o kształcie 8/20 μ s. Wymienione pomiary można wykonać na całym odgromniku, na poszczególnych członach lub częściach odgromnika. Napięcie obniżone jest sumą napięć obniżonych poszczególnych jego członów względnie części.

Przystępując do wykonania pomiarów charakterystyki prądowo-napięciowej, uprzednio należy określić kształt udaru prądowego wytwarzanego przez generator (rys. 8.16). W tym celu należy wykonać fotografię przebiegu czasowego prądu ze skalowaną osią czasową, a następnie na podstawie oscylogramu wyznaczyć parametry udaru T_1 i T_2 .

Dla wyznaczenia charakterystyki prądowo-napięciowej stosu zmiennooporowego odgromnika należy wykonać za pomocą oscyloskopu pomiar prądu i napięcia dla płytki zmiennooporowej dla czterech różnych wartości szczytowych prądu wyładowczego, dobierając każdorazowo odpowiedni bocznik.

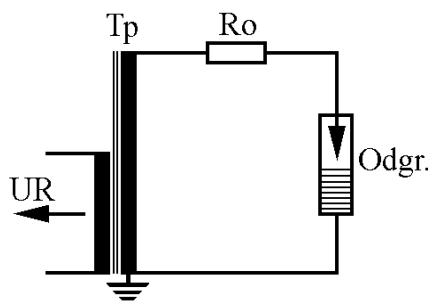
Opracowanie wyników pomiaru

W sprawozdaniu należy zamieścić oscylogram prądu udarowego oraz podać wartości T_1 i T_2 .

Na podstawie wyników pomiaru i obliczeń należy ocenić czy jest to płytka MO czy SiC. W przypadku płytki SiC należy wykreślić charakterystykę prądowo-napięciową stosu zmiennooporowego odgromnika złożonego z 12 płytek identycznych z płytką badaną oraz obliczyć wartość współczynnika zaworowości.

2.2. Pomiar statycznego napięcia zapłonu odgromnika zaworowego

Schemat połączeń



Rys. 8.17. Schemat układu do pomiaru napięcia statycznego odgromnika zaworowego
UR – układ regulacji napięcia, Tp – transformator probierczy, Ro – rezystor ograniczający prąd po zapłonie odgromnika, Odgr. – odgromnik zaworowy.

Sposób wykonania pomiaru

Znamionowe napięcie górne transformatora probierczego, użytego do próby statycznego napięcia zapłonu powinno mieć co najmniej 3.5-krotną wartość napięcia znamionowego badanego odgromnika.

W celu uniknięcia nadmiernego nagrzania się odgromnika należy ograniczyć prąd zwarciovowy po stronie napięcia probierczego do wartości $0.1 \div 0.7$ A, włączając w obwód rezystor ograniczający o odpowiednio dobranej rezystancji.

Przy pomiarze napięcia statycznego odgromnika zaleca się stosować prędkość podnoszenia napięcia $3 \div 20$ kV/s, przy czym mniejsze prędkości stosuje się dla odgromników na niższe napięcia. Przy pomiarze napięcia statycznego zapłonu odgromników z iskiernikami sterowanymi za pomocą rezystorów zaleca się stosować większe prędkości podnoszenia napięcia, do 40 kV/s, aby uniknąć nadmiernego nagrzania się rezystorów sterujących. Utrzymywanie przez dłuższy czas napięcia zapłonowego stwarza w stosunku do wszystkich odgromników niebezpieczeństwo ich uszkodzenia. Natychmiast po zapłonie napięcie należy wyłączyć.

Pomiar statycznego napięcia zapłonu wykonuje się w sposób następujący: podnosi się napięcie w układzie probierczym aż do wystąpienia zapłonu odgromnika. Sygnałem zapłonu odgromnika jest nagły skok wskazówki amperomierza, umieszczonego po stronie napięcia dolnego transformatora probierczego. Bezpośrednio przed zapłonem należy odczytać napięcie na woltomierzu po stronie dolnego napięcia transformatora. Znając przekładnię układu probierczego można policzyć wartość statycznego napięcia zapłonu. W przypadku badań technicznych wykonuje się pięciokrotny pomiar wartości napięcia zapłonu w odstępach czasu nie mniejszych niż 1 minuta. Wynik próby uznaje się za dodatni, jeśli każda z otrzymanych wartości napięcia zapłonu odpowiada wymaganiom norm.

Stosując się do powyższych zaleceń należy wykonać pomiar statycznego napięcia zapłonu dla odgromnika wskazanego przez prowadzącego ćwiczenie.

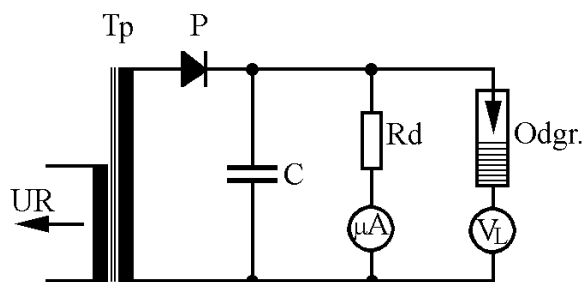
Opracowanie wyników pomiaru

W opracowaniu należy podać wartości pomierzonych napięć zapłonu badanego odgromnika oraz ocenę jego przydatności do dalszej eksploatacji.

2.3. Pomiar prądu upływu odgromnika zaworowego

Schemat połączeń





Rys. 8.18. Schemat układu do pomiaru prądu upływu odgromnika zaworowego
 UR – układ regulacji napięcia, Tp – transformator probierczy, P – prostownik, C –
 bateria kondensatorów, Rd, μA – układ do pomiaru napięcia stałego, VL – układ do
 pomiaru prądu upływu

Sposób wykonania pomiaru

Pomiar prądu upływu wykonuje się przy napięciu stałym. Dla odgromników jednoczłonowych pomiar wykonuje się przy napięciu równym 70 % najwyższego napięcia roboczego odgromnika, a dla odgromników wieloczłonowych przy napięciu równym około 40 % statycznego napięcia zapłonu badanego członu.

Przystępując do pomiaru prądu upływu należy uprzednio zapisać w protokole typ odgromnika, jego napięcie znamionowe oraz obliczyć wartość napięcia stałego, przy której pomiar będzie wykonywany. Następnie przykładając wyliczoną wartość napięcia do odgromnika należy odczytać i zanotować wskazania miernika prądu.

Opracowanie wyników pomiaru

W sprawozdaniu należy podać pomierzoną wartość prądu upływu i ocenę stanu izolacji odgromnika.

2.4. Pomiar napięcia obniżonego odgromnika zaworowego

Sposób wykonania pomiaru

Pomiar napięcia obniżonego odgromnika wykonuje się w układzie pokazanym na rys. 8.16. Generator udarów musi być tak wyskalowany, aby płynący przez odgromnik prąd odpowiadał znamionowemu prądowi wyładowczemu. Następnie wykonuje się oscylogram i z oscylogramu określa się wartość napięcia obniżonego.

Pomiar napięcia obniżonego w ćwiczeniu będzie wykonywany dla odgromnika o napięciu znamionowym 6 kV i o prądzie wyładowczym 1.5 kA.

Opracowanie wyników pomiaru

W sprawozdaniu należy zamieścić oscylogram napięcia obniżonego, podać jego wartość, a także określić poziom ochrony badanego odgromnika.

W sprawozdaniu należy ponadto wyznaczyć zmienność napięcia na zaciskach odgromnika, którego charakterystykę prądowo-napięciową określono w p. 2.1, zainstalowanego w stacji krańcowej, jeżeli po linii o impedancji falowej $Z = 400 \Omega$ porusza się fala napięciowa o wartości szczytowej 60 kV i ukośnym kształcie czoła, jak pokazano na rys.8.9. czas trwania czoła 1 μ s.

2.5. Dobór parametrów odgromnika MO

Dla warunków pracy układu sieciowego, zadanych przez prowadzącego ćwiczenie, dobrać według katalogów napięcie trwałej pracy odgromnika beziskiernikowego, podać jego poziom ochrony, zdolność pochłaniania energii oraz określić zasięg strefy ochronnej.

3. UWAGI I WNIOSKI



ĆWICZENIE 9

KOMPENSACJA PRĄDÓW ZIEMNOZWARCIOWYCH

1. WIADOMOŚCI OGÓLNE

1.1. Wstęp

Urządzenia pracujące w sieci elektroenergetycznej oraz sama sieć, narażone są na różnego rodzaju wzrosty napięcia (nazywane przebiegami) ponad wartość znamionową. Przebiegi te mogą być powodowane przez:

1. stany awaryjne sieci (głównie zwarcia jednej lub dwóch faz z ziemią). Cechą charakterystyczną tych przebiegów w stanie ustalonym jest ich częstotliwość w przybliżeniu równa częstotliwości sieci (50 Hz). Wyższe lub niższe częstotliwości przebiegu napięciowego mogą występować w przypadku tzw. przebiegów ferorezonansowych. Ta grupa przebiegów nazywana jest przebiegami dorywczymi, a czas ich trwania może dochodzić nawet do kilkunastu godzin.
2. stany łączeniowe w sieci. Sieć nie pracuje nigdy w stałej, niezmienniej konfiguracji. W zależności od wielkości i rodzaju obciążenia, włącza lub wyłącza się transformatory, kondensatory, turbogeneratory w elektrowniach (a nawet całe elektrownie tzw. elektrownie szczytowe) itp. Tego rodzaju czynności łączeniowe powodują krótkotrwałe (do ok. 10 ms trwające) przebiegi, nazywane przebiegami łączeniowymi.
3. uderzenie piorunu w stację elektroenergetyczną, bezpośrednio w linię lub w jej pobliżu. W wyniku wyładowania piorunowego powstają w liniach fale udarowe, przemieszczające się wzdłuż przewodów i zagrażające urządzeniom pracującym w układzie elektroenergetycznym. Są to przebiegi piorunowe. Czas trwania tych przebiegów jest rzędu mikrosekund.

Do oceny stopnia zagrożenia izolacji linii i urządzeń elektroenergetycznych stosuje się współczynnik nazywany **krotnością przebiegów**. Aby zapewnić niez-



kłóconą dostawę energii, sieć powinna być odporna na powyższe przebiecia, co oznacza, że nie powinny one doprowadzać do stanów awaryjnych w układzie elektroenergetycznym. W tym celu stosuje się odpowiedni poziom izolacji urządzeń, środki przeciwdziałające rozwojowi przebiec oraz urządzenia ochronne (np. odgromniki), które redukują przebiecia do poziomu gwarantującego bezawaryjną pracę układu. O wyborze techniczno-ekonomicznego projektu sieci decyduje zwykle najczęściej występujący rodzaj zakłócenia powodujący przebiecia. Do tej grupy zakłóceń należą zwarcia doziemne jednego lub dwóch przewodów.

Celem niniejszego ćwiczenia jest zapoznanie się ze skutkami jednofazowego zwarcia w sieci z izolowanym punktem gwiazdowym transformatora. Częstość występowania zwarć doziemnych sprawia, że przebiegom towarzyszącym tym zwarciom poświęca się wiele uwagi.

1.2. Uwagi ogólne o niesymetrycznych zwarciach doziemnych

Jedno i dwufazowe zwarcia doziemne stanowią do 99 % wszystkich zwarć występujących w sieciach wysokich napięć. Do przyczyn zwarć doziemnych zaliczyć można bezpośrednie uderzenie piorunu w linię, zwłaszcza w liniach bez ochrony odgromowej. Rozwój przebiec, ich krotność, skutki jakie mogą one wywołać oraz sposób ochrony zależy między innymi od sposobu uziemienia punktu gwiazdowego transformatora. Z punktu widzenia koordynacji izolacji urządzeń elektroenergetycznych w sieciach krajowych istnieją trzy sposoby uziemienia punktu gwiazdowego:

1. punkt gwiazdowy uziemiony bezpośrednio lub przez impedancję,
2. punkt gwiazdowy uziemiony przez cewkę gaszącą (sieć skompensowana),
3. punkt gwiazdowy izolowany.

Z wyborem jednego z wyżej wymienionych sposobów uziemienia punktu gwiazdowego transformatora związane są określone zagadnienia eksploatacyjne układu elektroenergetycznego. Zestawienie najistotniejszych, z punktu widzenia eksploatacji, konsekwencji wyboru sposobu uziemienia punktu gwiazdowego podano w tabeli 9.1.



Tabela 9.1 Wpływ sposobu uziemienia punktu gwiazdowego układu elektroenergetycznego na przebieg jego eksploatacji

Lp		Czynnik	Sposób uziemienia punktu gwiazdowego układu				
			bezpośrednie	przez rezystancję	przez indukcyjność	rezonansowe	izolowane
1	Prąd zwarcia doziemnego		duży, czasem większy od prądu zw. 3-faz.	obniżony, lecz większy od pojemnościowego prądu doziemnego	obniżony, lecz znacznie większy od pojemnościowego prądu doziemnego	skompensowany	równy pojemnościowemu prądowi zwarcia doziemnego
2	Przepięcia	częstotliwości podstawowej	0.8 Um	Um, czasem większe	(0.8 ÷ 1.0)Um	Um	Um
		nieustalone (łączeniowe)	najniższe	najniższe	w dopuszczalnych granicach najwyższe		
3	Nieustalone zwarcia doziemne		przechodzą w ustalone	przechodzą w zwarcia z prądem o wartości dopuszczalnej		zostają zlikwidowane	istnieje łuk zasilany prądem pojemnościowym
4	Uszkodzenie urządzeń przy zwarcu doziemnym		mogą być poważne	zmniejszone	zmniejszone	wykluczone	znaczne
5	Warunki pracy wyłączników		częste wyłączenia	częste wyłączenia	częste wyłączenia	wyłączenia rzadkie, wzrasta napięcie powrotne przy zw. 2-faz.	częste wyłączenia
6	Przełącznikowa ochrona od zwarć doziemnych		prosta i spełniająca zadanie			może być wykonana zadowalająco	nie spełnia zadania
7	Wtórne zjawiska przy wyłączeniach		duże prawdopodobieństwo wystąpienia			wyłączenia rzadkie	duże prawdopodobieństwo występowania
8	Pewność zasilania		nie zachowana bez specjalnych środków			zadowalająca	nie zachowana
9	Eksploatacja					konieczne strojenie cewki	prosta
10	Zakłócenia telefoniczne		wymagają największej uwagi	wymagają uwagi		nie powodują szczególnych trudności	
11	Zakłócenia radiowe		najmniejsze	małe		mogą być znaczne przy długotrwałych awariach	
12	Niebezpieczeństwo porażenia w miejscu uszkodzenia		duże	mniejsze		nieznaczne	często może być długotrwałe



1.3. Punkt gwiazdowy uziemiony bezpośrednio lub przez impedancję

Ten sposób uziemienia punktu gwiazdowego obejmuje w zasadzie również uziemienie punktu gwiazdowego przez cewkę gaszącą. Wobec rozległości problematyki kompensacji prądów ziemnozwarciowych ten sposób uziemienia punktu gwiazdowego (zwany również uziemieniem rezonansowym) rozpatrzono oddzielnie.

W praktyce przyjęły się (poza rezonansowym) następujące sposoby uziemienia punktu gwiazdowego:

- a. bezpośrednio,
- b. przez rezystancję,
- c. przez reaktancję indukcyjną.

W warunkach krajowych praktyczne znaczenie posiadają przypadki a) i b). Obliczenia wykonane metodą składowych symetrycznych trójfazowych umożliwiają obliczenie stosunku napięcia względem ziemi na fazie zdrowej $U_{(x)}$ lub na fazach zdrowych w czasie ustalonego zwarcia doziemnego do napięcia międzyprzewodowego przed zwarcie $\sqrt{3} U$. Stosunek ten nazywany jest współczynnikiem skuteczności uziemienia punktu gwiazdowego transformatora i określony jest zależnością:

$$k_z = \frac{U_{fx}}{\sqrt{3}U} \quad (9.1)$$

Z obliczeń tych wynika również, że przy spełnieniu nierówności:

$$\frac{X_o}{X_1} \leq 3 \quad \text{ i } \quad \frac{R_o}{X_1} \leq 1 \quad (9.2)$$

gdzie: X_1 , X_o – reaktancje zastępcze układu elektroenergetycznego odpowiednio dla składowej zgodnej i zerowej, R_o – rezystancja zastępcza układu elektroenergetycznego dla składowej zerowej

współczynnik $k_z = 0.8$.

Nierówności (9.2) określają warunki skutecznego uziemienia punktu gwiazdowego w układzie elektroenergetycznym. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że bezpośrednie uziemienie punktu zerowego układu nie zawsze zapewnia spełnienie nierówności (9.2) dla wszystkich układów elektroenergetycznych, a mogą wystąpić również przypadki, w których uziemienie punktu gwiazdowego przez



rezystancję odpowiada nierównościom (9.2). W rzeczywistości powszechnie stosowane określenie: „**bezpośrednie uziemienie punktu gwiazdowego**” jest nieściśle, gdyż punkt gwiazdowy przyłączony jest do uziomu stacyjnego o określonej skończonej wartości rezystancji, a więc jest to uziemienie punktu gwiazdowego przez rezystancję.

Współczynnik skuteczności uziemienia punktu gwiazdowego k_z przyjęto określać w procentach. Stąd pochodzą określenia: izolacja 100 %, izolacja 80 % itd. Określenie „80-procentowa izolacja” jest skrótem myślowym następującego rozumowania: jeśli przepięcia w stanie ustalonym nie przekraczają 80 % napięcia międzyprzewodowego w stanie normalnej pracy, to zamiast urządzeń ochronnych o 100 % napięciu zapłonu można dobrać urządzenia ochronne (odgromniki, iskierniki) o napięciach zapłonu obniżonych do 80 %. Wówczas poziom przepięć przez urządzenia ochronne zostaje obniżony i przy zachowaniu tego samego marginesu koordynacyjnego można obniżyć również napięcie probiercze urządzeń, a więc zastosować obniżoną do 80 % izolację urządzeń elektroenergetycznych. Obecnie stosuje się powszechnie izolację 80-procentową, a nawet 75-procentową w liniach najwyższych napięć. Można stosować jeszcze bardziej obniżony poziom izolacji, zaostrzając nierówność (9.2). Tak np. dla $k_z = 0.65$ muszą być spełnione nierówności:

$$\frac{R_o}{X_1} < 0.5 \quad \text{ i } \quad \frac{X_o}{X_1} < 1$$

Uziemienie punktu gwiazdowego przez rezystancję stosowane jest w układach elektroenergetycznych najwyższych napięć oraz niektórych układach średniego napięcia (w celu zmniejszenia jednofazowych prądów zwarcia, które w pewnych układach mogą być większe niż prądy zwarcia trójfazowego).

1.4. Punkt gwiazdowy izolowany

W warunkach krajowych układy elektroenergetyczne z izolowanym punktem gwiazdowym transformatora są układami średnich napięć, w których nie opłaca się stosować rezystancyjnego uziemienia punktu gwiazdowego lub kompensacji prądów ziemnozwarciowych. Są to przeważnie układy o małym pojemnościowym prądzie ziemnozwarciowym.

Do istotnych wad związanych z pracą układu elektroenergetycznego z izolowanym punktem gwiazdowym należy zaliczyć występowanie znacznych przepięć w stanie ustalonym (wzrost napięcia na fazach zdrowych w stosunku do ziemi do wartości napięcia międzyprzewodowego) i przepięć nieustalonych (przepięcia ziemnozwarciowe). Wśród zalet izolowanego punktu gwiazdowego

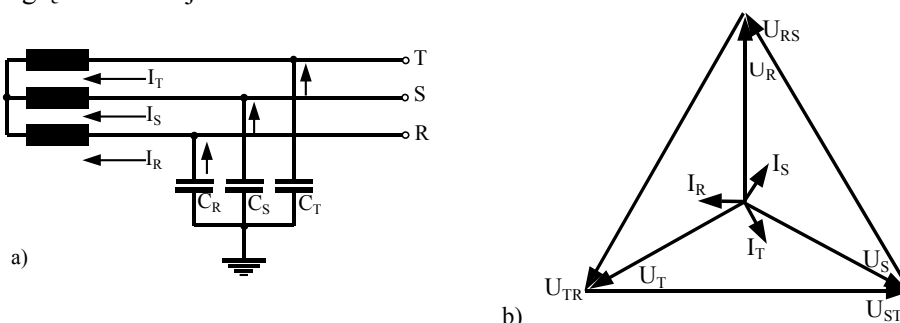


należy wymienić prostotę układów pracujących z izolowanym punktem oraz małe prądy zwarcia doziemnego.

1.5. Kompensacja prądu zwarcia doziemnego

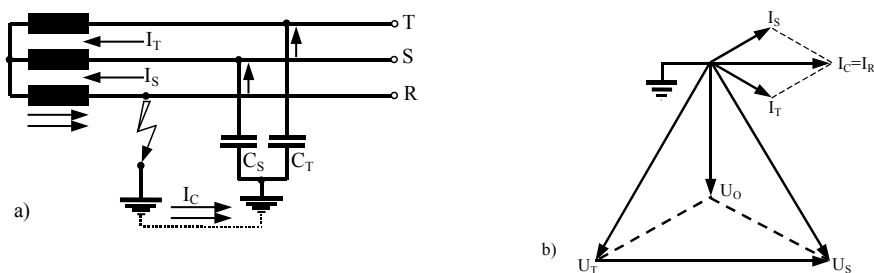
Rozważmy układ elektroenergetyczny pracujący z izolowanym punktem gwiazdowym, przedstawiony na rysunku 9.1a. W analizie pomijamy: reaktancję indukcyjną oraz konduktancję przewodów, natomiast pojemność linii przedstawimy w postaci stałych skupionych. (Przyjęcie do rozważań skupionych pojemności linii jest w tym przypadku dopuszczalne wobec niezbyt dużych długości linii poszczególnych odcinków linii średniego napięcia i małej częstotliwości rozważanych przebiegów).

O ile założymy, że pojemności $C_R = C_S = C_T = C$, to wykres wektorowy napięć fazowych i międzyprzewodowych oraz prądów płynących przez pojemności linii, nazywanych często prądami ładowania linii, przedstawiony jest na rysunku 9.1b. Jak widać z wykresu wektorowego, napięcie punktu gwiazdowego układu względem ziemi jest równe zero.



Rys. 9.1. Schemat zastępczy układu elektroenergetycznego z izolowanym punktem gwiazdowym a) i wykres wektorowy b)

Założmy, że w układzie tym powstanie bezoporowe zwarcie doziemne fazy R (rys. (9.2a); odpowiada to zwarcia pojemności C_R i zmniejszeniu napięcia tej fazy względem ziemi do zera. Ponieważ napięcia faz S i T względem fazy R nie ulegną zmianie, zatem fazy te znajdują się pod napięciem międzyprzewodowym względem ziemi, a prądy płynące przez pojemności faz zdrowych będą $\sqrt{3}$ razy większe od odpowiednich prądów płynących przed zwarcie. Ilustracją do powyższych rozważań jest wykres wektorowy napięć i prądów po zwarcie doziemnym fazy R w sieci z izolowanym punktem gwiazdowym, przedstawiony na rys. 9.2b.



Rys. 9.2. Schemat zastępczy układu elektroenergetycznego
a) i wykres wektorowy przy zwarciu doziemnym fazy R b)

Z wykresu tego wynika, że pojemnościowy prąd zwarcia doziemnego, płynący przez fazę R od źródła do miejsca zwarcia, równy jest sumie pojemnościowych prądów płynących w fazach S i T, a jego wartość bezwzględna wynosi:

$$I = \sqrt{3}U\omega C = 3U_f\omega C \quad (9.3)$$

gdzie: U – napięcie międzyprzewodowe,

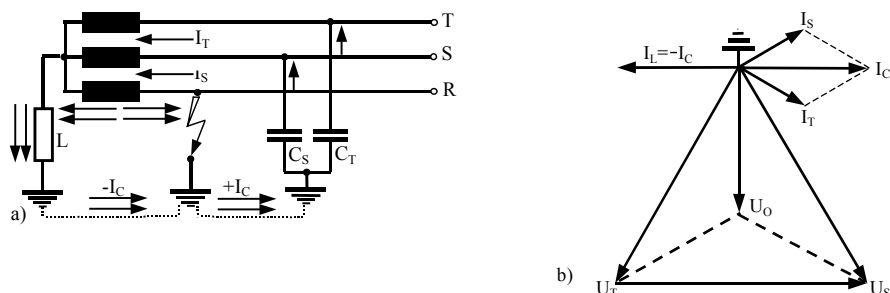
U_f – napięcie fazowe,

C – pojemność doziemna fazy.

W rezultacie zwarcia doziemnego punkt gwiazdowy układu znajduje się pod napięciem U_0 względem ziemi, równym co do wartości napięciu fazowemu układu przed zwarcie.

Prąd pojemnościowy zwarcia doziemnego płynie od źródła przez uziemiony przewód, łuk lub przez styk metaliczny do ziemi i powraca do źródła przez pojemność faz zdrowych. Przepływ tego prądu jest niepożądany szczególnie wtedy, gdy zwarcie doziemne zamyka się poprzez łuk, a to ze względu na możliwość rozwoju przepięć ziemnozwarciowych. Zgaszenie łuku, a więc i przerwanie zwarcia doziemnego możliwe jest wtedy, jeśli zmniejszymy prąd płynący przez miejsce zwarcia do zera. Z przeprowadzonych wyżej rozważań wynika, że możliwe to jest wtedy, jeśli przez miejsce zwarcia przepływać będzie prąd I i równy mu, lecz przeciwnie skierowany, inny prąd. Ponieważ prąd I ma charakter pojemnościowy, zatem przesunięty o 180° w stosunku do niego może być tylko prąd o charakterze indukcyjnym. Jak widać z wykresu wektorowego na rys. 9.2b, przepływ prądu o charakterze indukcyjnym jest możliwy w rozważanym układzie, jeśli napięcie punktu gwiazdowego U_0 będzie doprowadzone do zacisków cewki, to znaczy jeśli między punkt gwiazdowy układu i ziemię włączymy dła-

wik. Na tej zasadzie oparta jest kompensacja prądów ziemnozwarciowych, zastosowana po raz pierwszy przez Petersena ok. 1914 r. (**cewka Petersena**). Powyższe rozważania można łatwo przesledzić w oparciu o schemat z rys. 9.3b.



Rys. 9.3. Schemat zastępczy układu elektroenergetycznego a) i wykres wektorowy przy zastosowaniu kompensacji prądu ziemnozwarciowego b)

Z wykresu wektorowego na rys. 9.3b, sporządzonego przy pominięciu rezystancji i konduktancji układu elektroenergetycznego, wynika możliwość dobrania takiej wartości indukcyjności cewki, przy której prąd w miejscu zwarcia nie będzie płynął i łuk zgaśnie (stąd nazwa: **cewka gasząca** lub dawniej stosowana nazwa - **cewka gasikowa**):

$$I_L = \frac{U_0}{\omega L} = \frac{U_f}{\omega L} = 3U_f \omega C \quad (9.4)$$

Stąd warunek kompensacji zupełnej ma postać:

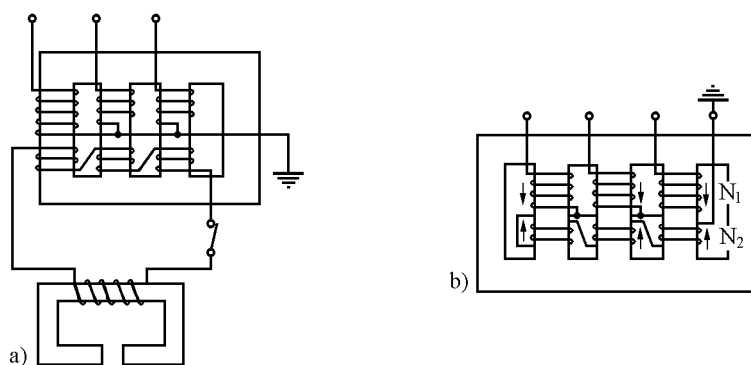
$$\omega L = \frac{1}{3\omega C} \quad (9.5)$$

1.6. Metody kompensacji prądów zwarcia doziemnego

Najczęściej stosowanym sposobem kompensacji prądu zwarcia doziemnego jest włączenie cewki gaszącej Petersena pomiędzy punkt gwiazdowy układu a ziemię. Istnieją jednak układy wymagające kompensacji prądu zwarcia doziemnego, w których punkt gwiazdowy transformatora jest niedostępny lub gdy jego konstrukcja uniemożliwia spełnienie warunku kompensacji; stosowane są wówczas transformatory gaszące (transformator Bauchera lub Reithoffera). Transformatory te dołącza się do trzech przewodów linii, a skutek zastosowania

ich jest taki sam, jak cewki Petersena, gdyż kompensują one prąd w miejscu zwarcia doziemnego. Ponieważ prąd transformatorów Baucha i Reithoffera nie przepływa przez transformatory zasilające sieć, zatem stosowanie tych aparatów możliwe jest w każdym przypadku, niezależnie od konstrukcji i parametrów transformatora zasilającego.

Schemat transformatora Baucha przedstawiony jest na rys. 9.4a. Jak widać z tego rysunku, transformator ten posiada czterokolumnowy rdzeń magnetyczny, pierwotne uzwojenie połączone w gwiazdę i wtórne uzwojenie połączone w trójkąt zamknięty przez dławik. Gdy w układzie elektroenergetycznym nie ma zwarcia doziemnego, transformator Baucha zachowuje się jak zwykły transformator w stanie jałowym. Zwarcie doziemne jednego przewodu układu równoważne jest ze zjawieniem się na całej sieci dodatkowego napięcia asymetrii (jest to napięcie występujące między punktem gwiazdowym a ziemią, równe co do wartości napięciu fazowemu w układzie przed zwarcie – porównaj rys. 9.2b). Dodatkowe napięcie asymetrii jako jednofazowe działa na wszystkie trzy uzwojenia pierwotne i powoduje przepływ prądu jednofazowego. Strumień magnetyczny wywołany tym prądem zamyka się przez czwartą kolumnę. W uzwojeniu wtórnym indukuje się napięcie – uzwojenie to wraz z dławikiem stanowi indukcyjne obciążenie dla transformatora Baucha, dające się regulować poprzez zmianę zaczepów cewki. Prąd w uzwojeniu pierwotnym proporcjonalny do prądu w uzwojeniu wtórnym jest prądem kompensującym prąd zwarcia doziemnego.



Rys. 9.4. Schematy zastępcze transformatorów kompensujących: a) Baucha, b) Reithoffera

Transformator Reithoffera (rys. 9.4b) tym głównie różni się od transformatora Baucha, że nie wymaga oddzielnego dławika, zastąpionego w tym przypadku przez dodatkowe uzwojenie nawinięte na czwartej kolumnie. Punkt gwiazdowy

uzwojenia pierwotnego nie jest uziemiony, lecz połączony z początkiem uzwojenia wtórnego. Uzwojenie wtórne połączone jest w szereg i uziemione.

Oprócz wyżej wymienionych sposobów kompensacji prądu zwarcia doziemnego, inne opisywane w literaturze aparaty przeznaczone do tego celu nie znalazły zastosowania.

1.7. Eksploatacja układów elektroenergetycznych z kompensacją prądu zwarcia doziemnego

W praktyce wielu krajów przyjęto zasadę, że jeśli prąd zwarcia doziemnego układu elektroenergetycznego przekracza pewną wartość graniczną, to konieczne jest stosowanie kompensacji. Ustanowione w tym zakresie wymagania w Polsce podaje tabela 9.2.

Tabela 9.2. Graniczne wartości prądu zwarcia doziemnego w układach elektroenergetycznych z izolowanym punktem gwiazdowym, powyżej której wymagane jest stosowanie kompensacji

Napięcie znamionowe sieci [kV]	3 ÷ 6	10	15 ÷ 20	30 ÷ 40	60
Pojemnościowy prąd zwarcia z ziemią [A]	30	20	15	10	5

Dla sieci napowietrznych wymagania te wynikają z możliwości samoczynnego zgaszenia łuku, poniżej pewnej wartości prądu zwarcia doziemnego. W sieciach kablowych sprawa wyboru granicznej wartości prądu zwarcia jest bardziej złożona. Odgrywają tu rolę między innymi zagadnienia cieplne i związane z tym możliwość zniszczenia izolacji międzyfazowej.

1.8. Prąd resztkowy i krotność przebieg w układach z kompensacją prądu zwarcia doziemnego

W warunkach rzeczywistych nie ma możliwości pełnej kompensacji prądu zwarcia doziemnego i przez miejsce zwarcia przepływa prąd resztkowy. Prąd resztkowy jest sumą prądów czynnych wynikających z istnienia rezystancji i konduktancji w układzie oraz prądu indukcyjnego wynikającego z niespełnienia warunku (9.5). Składową indukcyjną prądu resztkowego można zmniejszyć do zera przez zastosowanie układów kompensacyjnych z ciągłą automatyczną regulacją, natomiast składowej czynnej prądu resztkowego nie da się praktycznie zmniejszyć, tak więc prąd resztkowy wystąpi nawet w sieci idealnie skompensowanej. W praktyce automatyczna ciągłość regulacji stopnia kompensacji

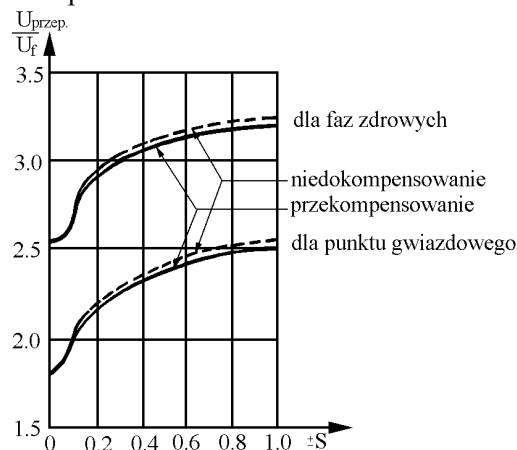


stosowana jest rzadko, w rezultacie czego należy zawsze liczyć się z określonym rozstrojeniem sieci, co można wyrazić wzorem (9.6):

$$S = \frac{I_L - I_C}{I_C} 100\% \quad (9.6)$$

- gdy $I_L > I_C$ mówimy, że sieć jest przekompensowana,
- gdy $I_L = I_C$ sieć jest skompensowana,
- gdy $I_L < I_C$ sieć jest niedokompensowana.

Wobec możliwości wyłączeń części układu elektroenergetycznego wydawałoby się, że należy przyjmować takie rozwiązanie konstrukcyjne sieci w którym $I_L < I_C$. Z uwagi na przebiegi przyjmuje się jednak dla warunków normalnych sieć z rozstrojeniem zawartym w granicach od $S = -5\%$ do $S = +15\%$. W sieciach o dużej asymetrii pojemnościowej zalecane jest utrzymywanie rozstrojenia w granicach od $S = +5\%$ do $S = +15\%$. Stopień rozstrojenia sieci ma wpływ na wartość przepięć towarzyszących zwarciom doziemnym. Ilustracją tego jest wykres (rys. 9.5), podający zależność współczynnika przepięć od stopnia kompensacji układu elektroenergetycznego.



Rys. 9.5. Wpływ rozstrojenia sieci na krotność przepięć

1.9. Uwagi o eksploatacji cewek kompensujących

Cewek gaszących nie wolno dołączać do punktu gwiazdowego transformatorów płaszczykowych, rdzeniowych (4- i 5-kolumnowych) o połączeniu uzwojeń gwiazda – gwiazda, jak również do punktu gwiazdowego trzech transformatorów jednofazowych o połączeniu uzwojeń gwiazda – gwiazda. Wynika to z dużej reaktancji indukcyjnej przy przepływie prądu jednofazowego przez tego typu transformatory, gdyż strumień wywołany tym prądem jest duży, jeśli jego droga zamyka się w żelazie kolumny. O ile jednak wyżej wymienione typy transformatorów mają jedno z uzwojeń roboczych połączone w trójkąt lub też dodatkowe uzwojenie trójkątowe, to dołączenie cewki do punktu gwiazdowego jest możli-

we, gdyż uzwojenie trójkątowe wytwarza amperozwoje kompensujące przy przepływie prądu jednofazowego amperozwoje uzwojenia gwiazdowego, przez co zmniejsza się strumień magnetyczny. Cewki można dołączać do punktu gwiazdowego transformatorów rdzeniowych (3-kolumnowych), które przedstawiają małą reaktancję indukcyjną dla prądu jednofazowego (strumień magnetyczny jest mały, gdyż zamyka się przez każdą transformatora, a nie przez żelazo kolumny). Tę reaktancję indukcyjną należy jednak dodawać do reaktancji indukcyjnej cewki gaszącej. W przypadku dołączenia cewki gaszącej do transformatora rdzeniowego należy uwzględnić dodatkowe grzanie transformatora przez prąd cewki. Z tego względu moc cewki nie może przekraczać $1/5$ mocy transformatora o uzwojeniach połączonych w gwiazdę i $1/2$ mocy transformatora przy połączeniu uzwojeń gwiazda – trójkąt.

Przy dołączaniu cewki gaszącej do punktu gwiazdowego generatora można dołączyć ją tylko do jednego z kilku pracujących równolegle generatorów, w przeciwnym bowiem przypadku powstałyby prądy wyrównawcze wynikłe z połączenia punktów gwiazdowych. Moc cewki gaszącej w tym przypadku może wynosić około $1/5$ mocy generatora.

Cewki gaszące w sieciach średnich napięć mogą pracować długotrwale, zwykle pracują nie krócej od czasu potrzebnego do zlokalizowania miejsca uszkodzenia i wykonania naprawy. Czasem bywa stosowane zwieranie wszystkich cewek gaszących w danym układzie elektroenergetycznym po powstaniu trwałego zwarcia doziemnego, a to w celu selektywnego włączenia uszkodzonego odcinka; w tych warunkach dobiera się cewki do krótkotrwałej pracy (np. nie przekraczające 10 min.).

1.10. Uwagi końcowe

Obok istotnych zalet kompensacji prądów zwarcia doziemnego, wynikających z powyższych rozważań, należy wspomnieć o wadach tego sposobu uzziemienia punktu gwiazdowego. Należą tu (por. tabela 9.1):

- a. możliwość występowania dużych przepięć w rozstrojonej sieci,
- b. możliwość uszkodzenia wyłączników wyłączających dwufazowe zwarcia w skompensowanym układzie,
- c. niezadowalająca ochrona przekątnikowa od zwarć doziemnych,
- d. konieczność strojenia układu,
- e. konieczność stosowania urządzeń kompensujących o dużej mocy w rozległych, rozbudowanych układach elektroenergetycznych,
- f. ryzyko długotrwałej pracy sieci ze zwarcie doziemnym wobec możliwości wystąpienia dalszych zwarć.

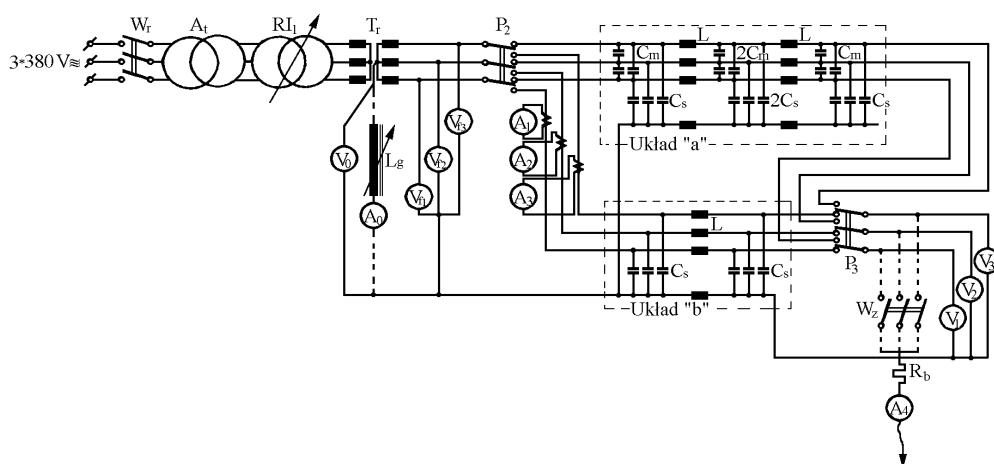


Te wszystkie wymienione wyżej zastrzeżenia nakazują staranne przeanalizowanie warunków pracy układu elektroenergetycznego, w którym zamierza się stosować kompensację prądu ziemnozwarciowego i w razie negatywnej oceny należy wybrać inny sposób uziemienia punktu gwiazdowego układu.

2. POMIARY

2.1. Pomiar przebiegów ustalonych i prądów zwarcia w układzie z izolowanym punktem gwiazdowym oraz kompensacja prądu zwarcia doziemnego przy pomocy cewki gaszącej

Schemat połączeń



Sposób wykonania pomiaru

UWAGA: Schemat układu pomiarowego, przedstawiony na rys. 9.6 jest połączony i w czasie ćwiczenia wolno wykonywać tylko przełączenia zgodnie z instrukcją obsługi urządzenia.

1. Pomiar napięć i prądów podczas normalnej pracy układu elektroenergetycznego:

- a. włączyć do sieci zasilającej model układu elektroenergetycznego. Za pomocą przycisków na pulpicie modelu wybrać układ „b” (izolowany punkt gwiazdowy),
- b. ustalić, regulując napięcie zasilające, wartość napięcia fazowego modelu nie większą niż 100 V (według wskazań na woltomierzach V_f) oraz odczytać i zanotować w protokole wartości napięć i prądów wskazywanych przez wszystkie mierniki zainstalowane w badanym układzie.

2. Pomiar napięć i prądów podczas zwarcia jednej fazy układu elektroenergetycznego z ziemią:

- a. dla ustawionej wartości napięcia fazowego modelu jak w punkcie poprzednim (p. 1) wykonać za pomocą wyłącznika Wz jednofazowe zwarcie doziemne,
- b. odczytać i zanotować w protokole wartość prądu zwarcia oraz wartości napięć i prądów wskazywanych przez wszystkie mierniki zainstalowane w badanym układzie,
- c. wyłączyć zwarcie (wyłącznik Wz) oraz wyłączyć napięcie zasilające model układu.

3. Kompensacja prądu zwarcia doziemnego w układzie „b” przy zastosowaniu cewki gaszącej:

- a. punkt gwiazdowy transformatora Tr połączyć z ziemią poprzez cewkę gaszącą,
- b. włączyć napięcie zasilające model układu i ustawić te same wartości napięcia fazowego jak w pomiarach poprzednich,
- c. za pomocą wyłącznika Wz wykonać jednofazowe zwarcie doziemne,
- d. regulując wartość indukcyjności cewki L_g zaczepami i szczeliną, doprowadzić do minimalnej wartości prądu zwarcia doziemnego,
- e. odczytać i zanotować w protokole wartość prądu zwarcia oraz wartości napięć i prądów wskazywanych przez wszystkie mierniki zainstalowane w badanym układzie,
- f. zbadać wartości napięć i prądów w układzie przekompensowanym i niedokompensowanym, zapisując wskazania mierników,



- g. wyłączyć zwarcie (wyłącznik Wz) oraz wyłączyć napięcie zasilające model układu.

Opracowanie wyników pomiaru

Na podstawie przeprowadzonych badań uzasadnić rozpływ prądu ziemno-zwarciovego i rozkład napięć w sieci z izolowanym punktem gwiazdowym podczas zwarcia jednofazowego z ziemią, przytaczając charakterystyczne zależności i wykresy wektorowe.

3. UWAGI I WNIOSKI



ĆWICZENIE 10

PRZEBIECIA FERROREZONANSOWE

1. WIADOMOŚCI OGÓLNE

W układach elektroenergetycznych, przy zmianach konfiguracji wywołanych łączeniami lub przy wystąpieniu jakiegoś zakłócenia np. zerwanie przewodu albo tzw. niepełnofazowego łączenia, mogą wyodrębniać się obwody elektryczne zawierające elementy nieliniowe (np. transformatory, przekładniki lub dławiki z nasyconymi rdzeniami). Nieliniowa indukcyjność gałęzi magnesujących łącznie z pojemnością i rezystancją układu tworzy obwód drgający **RLC**. Zachodzące w takim obwodzie procesy charakteryzują się dużą różnorodnością form. Szczególnie ważną grupę drgań w obwodzie nieliniowym stanowią drgania wymuszone siłami zewnętrznymi okresowo zmieniającymi się. Odpowiedź obwodu zależy głównie od jego własności, ale także od charakteru siły elektromotorycznej (SEM). Do osobliwości obwodu nieliniowego należy występowanie w nim nieciągłych skokowych zmian amplitudy drgań, tzw. skoku ferrozonansowego przy stosunkowo powolnych zmianach SEM.

W obwodzie nieliniowym, w odróżnieniu od obwodu liniowego, mogą rozwijać się drgania rezonansowe o pulsacjach różnych od pulsacji SEM wymuszającej te drgania. W związku z tym w literaturze wyróżnia się następujące rodzaje drgań:

1. rezonans harmoniczny,
2. rezonans ultraharmoniczny (nadharmoniczny),
3. rezonans subharmoniczny (podharmoniczny).

Inną interesującą cechą obwodu nieliniowego jest możliwość występowania w nim wielu stanów ustalonych. Zaistnienie tego lub innego stanu ustalonego określone jest przez warunki początkowe, a w szczególności zależy od momentu włączenia SEM do obwodu.

W celu poznania własności fizycznych ferrozonansu rozpatrzmy zjawiska zachodzące w obwodzie przedstawionym na rysunku 10.1. Równanie różniczkowe opisujące stan przejściowy tego obwodu ma postać:



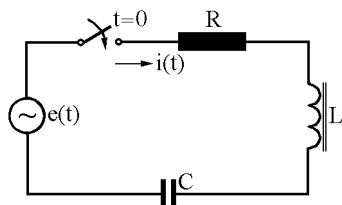
$$\frac{d^2 \psi}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = \frac{de_{(t)}}{dt} \quad (10.1)$$

gdzie: ψ – wartość chwilowa magnetycznego strumienia skojarzonego,

$i = f(\psi)$ – wartość chwilowa prądu,

$e_{(t)}$ – siła elektromotoryczna.

Rozwiązanie, nawet przybliżone, równania (10.1) jest bardzo uciążliwe. Dlatego też dla oceny jakościowej procesów zachodzących w nieliniowym obwodzie czyni się zwykle szereg upraszczających analizę założeń.



Rys. 10.1. Schemat zastępczy obwodu nieliniowego RLC

Dla uzyskania niezbędnych informacji o zachowaniu się obwodu z rysunku 10.1 zastosujemy metodę analityczno-graficzną, pomijając w pierwszym przybliżeniu wpływ strat czynnych w obwodzie oraz występowanie drgań nad- i podharmonicznych. Nieliniowa zależność $i = f(\psi)$ wykorzystana

będzie w postaci charakterystyki napięciowo-prądowej.

Przy powyższych założeniach dla każdego stanu ustalonego obwodu słuszną jest zależność:

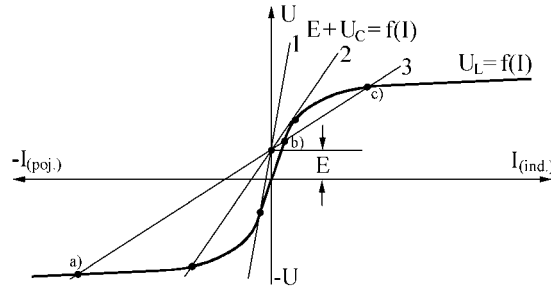
$$\underline{E} = \underline{U}_L + \underline{U} \quad (10.2)$$

Napięcia $\underline{U}_L$ i $\underline{U}_C$ przy pominięciu strat czynnych (elementy idealne) przesunięte są o 180° , przy czym jeśli $\underline{U}_L > \underline{U}_C$, to prąd w obwodzie ma charakter indukcyjny, a w przeciwnym przypadku – pojemnościowy. Jeśli przyjąć indukcyjny prąd za dodatni, to równość (10.2) można zapisać następująco:

$$\pm \underline{U}_L = \underline{E} + \underline{U}_C \quad (10.3)$$

Do dalszej analizy składowe równości (10.3) wykreślimy w postaci charakterystyk w prostokątnym układzie współrzędnych $U - I$ (rys. 10.2).





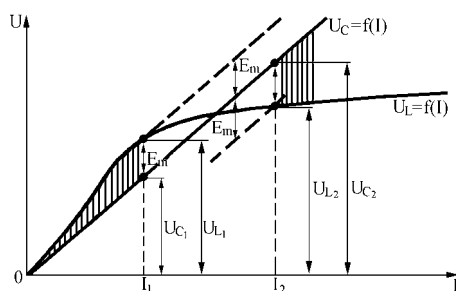
Rys. 10.2. Charakterystyki napięciowo-prądowe dla obwodu z rys. 10.1

Warunki równowagi obwodu spełnione są w punktach przecięcia się charakterystyk $U_L = f(I)$ i $E + U_C = f(I)$. Przy małych wartościach pojemności (rys. 10.2, prosta 1) istnieje tylko jeden punkt przecięcia charakterystyk leżący w obszarze ujemnych prądów. W tym przypadku charakter prądu jest pojemnościowy. Przy większych wartościach pojemności charakterystyki mogą mieć trzy punkty wspólne (prosta 3), z których dwa (b i c) odpowiadają indukcyjnemu charakterowi prądu, natomiast punkt a odpowiada prądowi pojemnościowemu. Napięcie na pojemności, dla równowagi określonej punktami b i c, jest w fazie z napięciem źródła, natomiast w punkcie a w fazie z SEM jest napięcie na indukcyjności. Jak widać z rysunku, w rozważanym obwodzie nieliniowym mogą rozwijać się drgania o różnych wartościach amplitudy.

Można dowiedzieć przy pomocy skomplikowanych obliczeń analitycznych, że z trzech rozwiązań obwodu tylko dwa, oznaczone punktami a i b, są stabilne, natomiast rozwiązanie trzecie (punkt c) odpowiada stanowi niestabilnemu. Stan równowagi określony punktem b charakteryzuje się stosunkowo niedużym napięciem na elementach obwodu i prądem opóźnionym w fazie w stosunku do SEM, tj. odwrotnie niż w punkcie a, gdzie w obwodzie występują duże wartości napięcia, a prąd wyprzedza w fazie SEM. Jaki z wyżej wymienionych stanów równowagi obwodu ustali się, zależy od warunków początkowych, tj. od wartości napięcia początkowego na pojemności i od nasycenia magnetycznego cewki.

Rozważmy, jakie zjawiska będą zachodziły w obwodzie nieliniowym (rys. 10.1) przy zmianie amplitudy SEM. Jeżeli zwiększać będziemy wartość E od zera, to do pewnej wartości towarzyszy tej zmianie wzrost prądu o charakterze indukcyjnym (rys. 10.3). Przy wartości $E = E_{\max}$ nie można zwiększać SEM dalej w sposób płynny, gdyż następuje nagły skokowy wzrost prądu w obwodzie od wartości I_1 do wartości I_2 przy tej samej wartości $E_{\max}$, przy czym prąd I_2 zmienia charakter z indukcyjnego na pojemnościowy.





Rys. 10.3. Określenie wpływu zmian napięcia źródłowego na stan równowagi obwodu

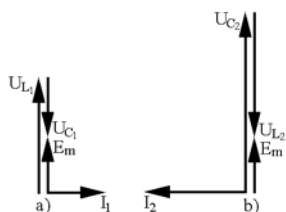
ku przedstawia rys. 10.5 (krzywa $R = 0$). W rzeczywistości, w rozważanym obwodzie występują straty energii. Uwzględniając rezystancję R zależność (10.2) będzie miała postać:

$$\underline{E} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C \quad (10.4)$$

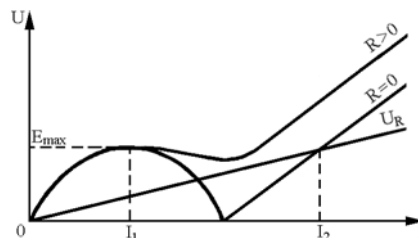
natomiast przebieg zmian E w funkcji prądu dla tego przypadku przedstawia krzywa $R > 0$ na rys. 10.5. Jak wynika z powyższego, powyżej pewnej krytycznej wartości R charakterystyka $E = f(I)$ nie będzie posiadała ujemnego nachylenia. W takim przypadku skok ferorezonansowy jest niemożliwy i zjawisko przewrotu w obwodzie nie wystąpi.

Z przeprowadzonych dotychczas rozważań wynika również, że dla zaistnienia zjawiska ferorezonansu w obwodzie musi znajdować się pojemność o pewnej określonej wartości i transformator lub dławik z nasyconym rdzeniem. Warunkiem koniecznym do wystąpienia ferorezonansu jest przecięcie się charakterystyk napięciowo-prądowych kondensatora i dławika.

Zjawisko przewrotu może wystąpić także w obwodzie szeregowo-równoległym (rys. 10.6). Analizę graficzną tego obwodu przedstawia rys. 10.7.



Rys. 10.4. Wykresy wektorowe dla obwodu RLC: a) przed przewrotem, b) po przewrocie



Rys. 10.5. Zmiana napięcia źródłowego w zależności od prądu w obwodzie

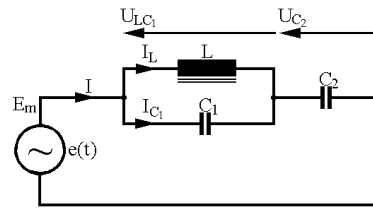
W celu wykreślenia charakterystyki $E = f(I)$ dla obwodu szeregowo-równoległego należy najpierw wykreślić charakterystykę $U_{LC1} = f(I)$ zespołu równoległe połączonego dławika L i kondensatora C_1 , sumując prądy I_L i I_C dla poszczególnych spadków napięcia U_{LC1} (rys. 10.7a), a następnie tę

charakterystykę należy zsumować z charakterystyką $U_{C2} = f(I)$, dodając dla określonych wartości prądu napięcia U_{LC1} i U_{C2} (rys. 10.7b).

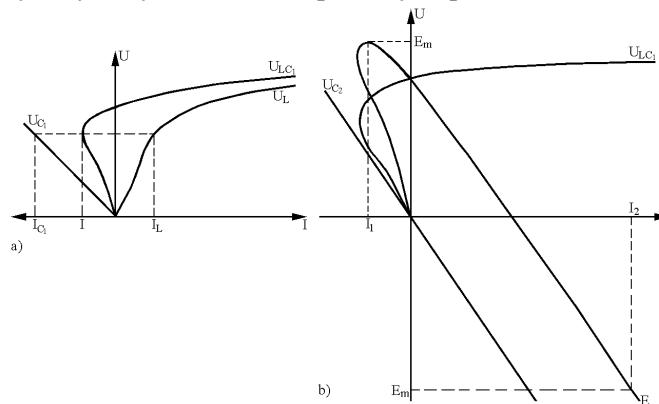
Z otrzymanych charakterystyk wynika, że przy wzroście amplitudy napięcia źródłowego do wartości $E = E_{\max}$ nastąpi skok ferrezonansowy. Należy zauważyć, że w rozpatrywanym przypadku po przewrocie charakter obwodu nadal jest pojemnościowy, a więc pozostał bez zmian (charakterystyka $E = f(I)$ przebiega w II i IV ćwiartce). Taki stan ferrezonansowy obwodu określa się jako przewrót niepełny w przeciwieństwie do przewrotu pełnego, tj. takiego, przy którym następuje zmiana charakteru obwodu z indukcyjnego na pojemnościowy lub na odwrót.

Zarówno w przypadku przewrotu pełnego, jak i niepełnego, zjawisku temu towarzyszy nagły wzrost prądu i napięć na poszczególnych elementach obwodu. Tak więc zjawisko ferrezonansu może być przyczyną powstania znacznych przepięć, groźnych dla izolacji elementów obwodów, w których zaistnieje.

Jeżeli parametry obwodu spełniają warunki konieczne do powstania ferrezonansu, to zjawisko takie może być wywołane stanem nieustalonym obwodu, np. w wyniku wykonywanych łączeń lub przerwy w przewodzie fazowym,



Rys. 10.6. Schemat zastępczy obwodu szeregowo-równoległego ($R = 0$)



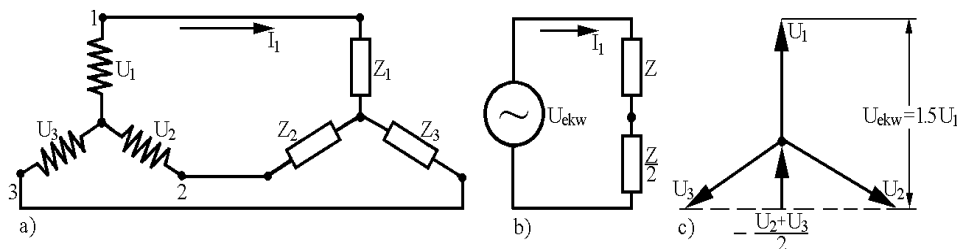
Rys. 10.7. Charakterystyki napięciowo-prądowe dla obwodu szeregowo-równoległego

W układach elektroenergetycznych, jak wspomniano na wstępie, mogą wyodrębniać się nieliniowe obwody, przy czym zmianom konfiguracji sieci towarzyszą stany nieustalone. W wyniku drgań obwodu w stanie przejściowym może dojść do rezonansu pewnej harmonicznej przebiegu, określonej przez parametry obwodu, co w konsekwencji prowadzi do powstania przebiegów. Najbardziej typowym układem, w którym łatwo dochodzi do wystąpienia przebiegów ferorezonansowych, jest niepełnofazowe włączenie pod napięcie linii z nieobciążonym transformatorem na końcu.

W literaturze specjalistycznej wymienia się następujące przyczyny, które mogą doprowadzić do wywołania zjawiska ferorezonansu w układach elektroenergetycznych:

- przerwanie przewodu w układzie z izolowanym punktem gwiazdowym, połączone z jego opadnięciem na ziemię,
- przerwanie przewodu w układzie z uziemionym punktem gwiazdowym (bez zwarcia doziemnego),
- przerwanie dwóch przewodów w układzie z uziemionym punktem gwiazdowym.

Wymienione wyżej przypadki asymetrii w układzie trójfazowym prowadzą do przebiegów, które w sposób uproszczony można analizować w oparciu o zastępczy schemat jednofazowy. Wymienione w punktach a), b) i c) przypadki asymetrii odpowiadają zastępczemu układowi trójfazowemu, w którym źródło o nieskończonej mocy, generujące asymetryczny układ napięć, zasila układ połączonych w gwiazdę impedancji Z_1, Z_2, Z_3 , takich, że $Z_2 = Z_3 = Z$ (rys.10.8a).



Rys. 10. 8. Schemat zastępczy: a) układ trójfazowy, b) obwód jednofazowy, c) wykres wektorowy źródła zastępczego

Posługując się metodą superpozycji możemy zestawić jednofazowy obwód zastępczy, na podstawie którego określimy wektor prądu I_1 płynący w fazie 1 pod wpływem każdego z napięć fazowych:

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_1 + \frac{Z}{2}} - \frac{U_2}{Z + \frac{Z_1 Z}{Z_1 + Z}} * \frac{Z}{Z_1 + Z} - \frac{U_3}{Z + \frac{Z_1 Z}{Z_1 + Z}} * \frac{Z}{Z_1 + Z} = \frac{U_1 - \frac{U_2 + U_3}{2}}{Z_1 + \frac{Z}{2}} \quad (10.5)$$

W przypadku symetrycznego trójfazowego źródła, w którym $U_1 = U_2 = U_3 = U_f$,

$$U_1 - \frac{U_2 + U_3}{2} = 1.5U_f$$

(rys. 10.8c), a zatem wyrażenie (10.5) możemy zapisać w postaci:

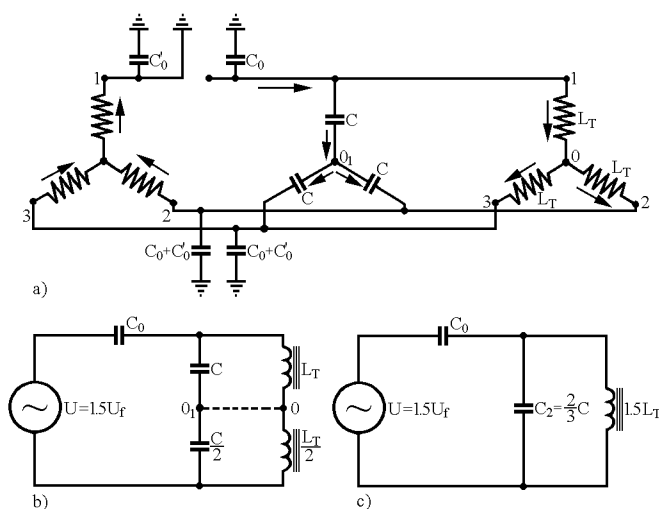
$$I_1 = \frac{1.5U_f}{Z_1 + \frac{Z}{2}} \quad (10.6)$$

Wyrażeniu temu odpowiada jednofazowy schemat zastępczy przedstawiony na rys. 10.8b, który można wykorzystać do analizy przebiegów ferorezonansowych.

Rozpatrzmy obecnie układ z izolowanym punktem gwiazdowym, w którym nastąpiło przerwanie przewodu, połączone z jego opadnięciem na ziemię. Schemat zastępczy tego obwodu przedstawia rys. 10.9a. W oparciu o powyższe rozważania możemy ustalić jednofazowy schemat zastępczy (rys. 10.9b). Ponieważ pomiędzy punktami 0 i 0₁ prąd nie płynie, schemat z rys. 10.9b można uprościć do postaci obwodu przedstawionego na rys. 10.9c. Układ ten podobny jest do obwodu z rys. 10.6. W oparciu o ten schemat można stosunkowo łatwo obliczyć wartości napięć na poszczególnych elementach układu. Jeżeli w układzie z rys. 10.9c wystąpi zjawisko przewrotu, napięcie na pojemności C₂, w skład której wchodzi pojemność doziemna fazy 1, zmieni po przewrocie znak i zwiększy swą wartość (por. wykres wektorowy na rys. 10.4). Obrótowi o 180° wektora napięcia fazy 1 odpowiada zmiana następstwa wektorów (zamiast 1 - 2 - 3 będzie po przewrocie następstwo faz 1 - 3 - 2). Zmiana następstwa faz daje w wyniku wystąpienia przewrotu w układzie trójfazowym zmianę kierunku wirowania silników asynchronicznych małej mocy.

Asymetrie w układzie elektroenergetycznym wymienione w punktach b) i c), mogące wywołać zjawisko przewrotu, można także analizować w obwodzie jednofazowym, parametry elementów i wartości napięć źródłowych będą w każdym z tych przypadków inne niż w obwodzie przedstawionym na rys. 10.9c.



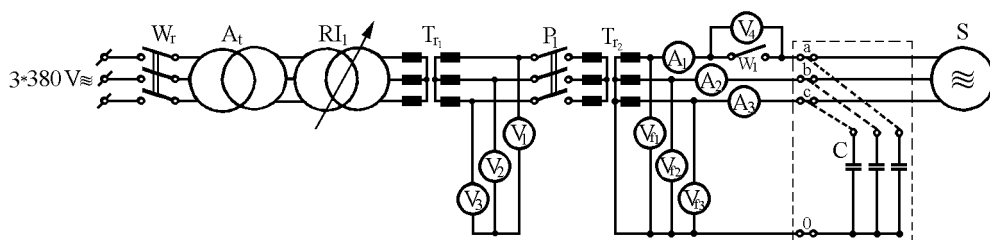


Rys. 10.9. Schemat zastępczy układu elektroenergetycznego z przerwą w przewodzie: a) schemat trójfazowy, b) i c) równoważne schematy jednofazowe

2. POMIARY

2.1. Badanie zjawiska przewrotu w układzie trójfazowym

Schemat połączeń



Rys. 10.10. Schemat połączeń modelu układu elektroenergetycznego
Wr – wyłącznik ręczny, *W1* – wyłącznik jednobiegunowy, *P1*, – przełącznik, *At* – autotransformator, *RI1* – regulator indukcyjny trójfazowy, *Tr1* – transformator $380 \pm 10 \% / 380 \pm 10 \%$, 9 kVA, $U_z = 3,7 \%$, *Tr2* – transformator 24/220 V, *A1*, *A2*, *A3* – amperomierze wskazujące prądy fazowe, *Vf1*, *Vf2*, *Vf3* – woltomierze do pomiaru napięcia fazowego, *V1*, *V2*, *V3* – woltomierze wskazujące napięcie przewodowe, *V4* – woltomierz do pomiaru napięcia na przewodzie, *S* – silnik trójfazowy, *C* – kondensatory

Sposób wykonania pomiarów

UWAGA: Model układu elektroenergetycznego, schematycznie pokazany na rys. 10.10, jest połączony i w czasie ćwiczenia wolno wykonywać tylko przełączenia zgodnie z instrukcją obsługi urządzenia.

- a. włączyć do sieci zasilającej model układu elektroenergetycznego. Za pomocą przycisków na pulpicie wybrać układ połączeń jak na rys. 10.10,
- b. na tablicy zaciskowej dołączyć do zacisków a_1 , b_1 i c_1 odpowiednio równe pojemności o wartości około $10\ \mu\text{F}$ (rys. 10.10),
- c. przy zamkniętym wyłączniku W_1 włączyć wyłącznik W_r i za pomocą regulatora trójfazowego RI_1 podnosić napięcie do chwili, w której silnik zacznie się obracać,
- d. odczytać i zapisać w protokóle wskazania mierników zainstalowanych w modelu układu,
- e. obserwując kierunek wirowania silnika wykonać przerwę w jednej fazie linii otwierając wyłącznik W_1 ,
- f. zanotować w protokóle wskazania mierników i wyłączyć napięcie zasilające model układu,
- g. powtórzyć pomiary dla innych wartości pojemności dołączonych do zacisków a_1 , b_1 i c_1 , wyniki pomiarów zanotować w protokóle.

UWAGA: Po wykonaniu przerwy w przewodzie, pomiary należy wykonywać szybko ze względu na przeciążenie i znaczne przepięcia powstające w układzie.

Opracowanie wyników pomiaru

Na podstawie wyników pomiarów obliczyć krotności przepięć fazowych i międzyprzewodowych w modelu układu w chwili wystąpienia przerwy w przewodzie.

3. UWAGI I WNIOSKI



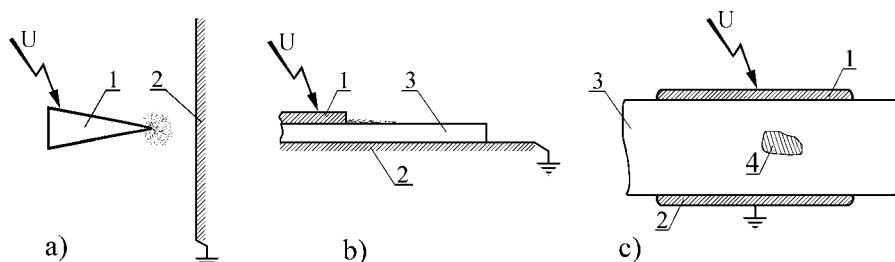
ĆWICZENIE 11

WYŁADOWANIA NIEZUPEŁNE

1. WIADOMOŚCI OGÓLNE

1.1. Pojęcia podstawowe

Wyładowaniem niepełnym nazywane jest wyładowanie, które nie przekształca się w przewodzący kanał plazmowy zwierający elektrody. Wyładowanie to pojawia się w układach izolacyjnych o polu nierównomiernym, zwykle na elektrodach o dużej krzywiznie (ostrza, krawędzie) lub we wtrącinach gazowych znajdujących się w dielektrykach stałych, po przekroczeniu wartości napięcia, nazywanego „**napięciem początkowym**” U_j lub „**progiem jonizacji**”.



Rys. 11.1. Układy elektrod, w których mogą powstać różnego rodzaju wyładowania niepełne

1, 2 – elektrody, 3 – dielektryk, 4 – wtrącina gazowa

Rozróżnia się trzy podstawowe formy wyładowań niepełnych:

- jeśli elektrody są pograżone całkowicie w dielektryku gazowym lub ciekłym; takie wyładowanie nazywane jest **ulotem** (rys. 11.1a)
- jeśli wyładowanie rozwija się wzdłuż powierzchni dielektryku stałego, do którego przylegają krawędzie elektrod; mówimy wówczas o **wyładowaniu ślizgowym** (rys. 11.1b),

- jeśli wyladowania występują we wtrącinach gazowych, znajdujących się wewnątrz dielektryka stałego; mówimy wtedy o **wyladowaniach wewnętrznych** lub o **jonizacji we wtrącinach** dielektryku (rys. 11.1c).

1.2. Oddziaływanie wyladowań niezupełnych na izolację

Dielektryki nieorganiczne (np. mika, porcelana, szkło) są odporne na oddziaływanie wyladowań niezupełnych. Natomiast w dielektrykach organicznych (np. papier w oleju, papier bakelizowany, żywice naturalne i sztuczne, lakiery) występują pod wpływem wyladowań niezupełnych przemiany fizykochemiczne, określane jako miejscowe **zwęglenie** dielektryka. Wyladowania ślizgowe zlobią na powierzchni papieru bakelizowanego czarne, półprzewodzące kanaliki. Długotrwała jonizacja w mikrowtrącinach papierowej izolacji kabla prowadzi do zwęglenia ścianek wtrącin, torując drogę przebicia np. izolacji kabla. Wyladowania niezupełne stanowią jedną z przyczyn **degradacji izolacji**. To pojęcie oznacza proces prowadzący do stopniowego obniżania własności izolacyjnych całego układu izolacyjnego jak również lokalną utratę tych własności. **Starzenie** wywołane wyladowaniami niezupełnymi zmniejsza długość życia izolacji. Zagadnienie to występuje prawie we wszystkich urządzeniach stosowanych w elektroenergetyce przy napięciach przemiennej. We wszystkich układach izolacyjnych zawierających dielektryki organiczne wyladowania niezupełne są niedopuszczalne, nie mogą zatem one przekraczać pewnego, określonego przez normy, poziomu. Tak więc **napięcie progu jonizacji musi być dla danego urządzenia znacznie większe od jego napięcia roboczego**.

W układach izolacyjnych złożonych wyłącznie z dielektryków nieorganicznych wyladowania niezupełne są mniej szkodliwe dla układu izolacyjnego, ale i w tych układach należy je eliminować lub ograniczać do minimum. Należy ponadto dodać, że ulot występujący w liniach elektroenergetycznych jest przyczyną znacznych strat energetycznych a także zakłóceń radiowych i innych uciążliwości dla środowiska naturalnego. Skutkiem ulotu w liniach jest wytwarzanie w otoczeniu ozonu O_3 oraz tlenków azotu. Tlenki te w połączeniu z wilgocią tworzą kwasy: azotowy HNO_3 i azotawy HNO_2 , które działają szkodliwie na materiały organiczne takie jak celuloza, kauczuk oraz na metale, a więc niszczą przewody linii.



1.3. Charakterystyka poszczególnych form wyładowań niezupełnych oraz sposoby zapobiegania im

1.3.1. Ulot

Ulot jest wyładowaniem niezupełnym **samoistnym** i nie zwiera elektrod. Analizując mechanizm rozwoju wyładowania w układzie izolacyjnym o polu nierównomiernym (rys. 11.2) można wyprowadzić, wzorując się na rozumowaniu Townsenda, warunek samoistości wyładowań w następującej postaci:

$$\gamma \left(\exp \int_0^{x_0} \alpha_x dx - 1 \right) = 1 \quad (11.1)$$

gdzie: γ - współczynnik zależny od materiału elektrod,
 α - współczynnik jonizacji zderzeniowej, zależny od K i przyjmuje się, że $\alpha > 0$ dla $K = K_j$ (dla powietrza $K_j = 21 \text{ kV/cm}$),
 x_0 - w przedziale $x \in \langle 0, x_0 \rangle$, $K = K_j$ (patrz rys. 11.2b).

Z zależności tej wynika, że warunkiem wystąpienia ulotu jest, aby

$\int_0^{x_0} \alpha_x dx$ posiadała odpowiednią wartość

$$\int_0^{x_0} \alpha_x dx = \ln \left(\frac{1}{\gamma} + 1 \right) \quad (11.2)$$

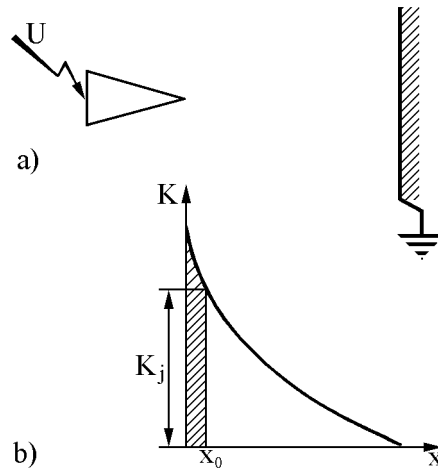
czyli, żeby natężenie pola K było większe od K_j w pewnej warstewce x_0 . Peek badał szczegółowo to zjawisko, w wyniku czego ustalił empirycznie wzory na K_j oraz x_0 dla układów walcowych w powietrzu. Upraszczając zagadnienie możemy przyjąć, że ulot występuje wówczas, gdy naprężenie elektryczne w dowolnym punkcie układu izolacyjnego przekroczy pewną dopuszczalną (krytyczną) wartość (np. dla powietrza 21 kV/cm). Wobec tego ustalamy wniosek praktyczny:

aby nie dopuścić do wystąpienia ulotu należy tak kształtować elektrody wszelkich urządzeń, aby przy napięciu roboczym nie występowały na ich powierzchniach nadmierne naprężenia, wyższe od K_j .

Zagadnienie to można – w przypadku elektrod o kształtach regularnych – rozwiązać za pomocą obliczeń. W wielu wypadkach obliczenia takie są zbyt



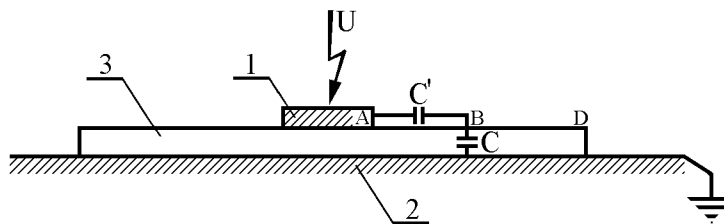
skomplikowane lub wręcz niewykonalne, wówczas posługujemy się metodami analogowymi wyznaczania naprężeń (np. wanna elektrolityczna, papier półprzewodzący).



Rys. 11.2. Wyładowania niezupełne w polu nierównomiernym
a) układ elektrod ostrze – płyta, b) rozkład natężenia pola elektrycznego w tym układzie

1.3.2. Wyładowania ślizgowe

Mechanizm powstawania wyładowań ślizgowych rozważymy w układzie uproszczonym, jak pokazano na rys. 11.3.



Rys. 11.3. typowy układ elektrod, w którym mogą wystąpić wyładowania ślizgowe
1, 2 – elektrody, 3 – dielektryk

Rozpatrzmy drobny element powierzchni granicznej, np. w otoczeniu punktu B i jego pojemność C i C' w stosunku do elektrod 1 i 2. Wskutek tego, że przenikalność dielektryczna materiału stałego jest wielokrotnie wyższa od przenikalności dielektryku otaczającego (np. powietrza) pojemność C będzie

znacznie większa od pojemności C' ($C \gg C'$). A zatem na C' przypadnie znacznie większa część napięcia międzyelektrodowego U zgodnie z wzorem:

$$U' = U \frac{C}{C + C'} \quad (11.3)$$

Taki rozkład napięcia może wywołać znaczne naprężenia w dielektryku otaczającym na powierzchni granicznej AD i rozwój wyładowań niezupełnych o dużej intensywności. Wyładowania te przyjmują postać **iskier ślizgowych** i rozwijają się od elektrody mniejszej (1) po powierzchnię w kierunku do elektrody większej (2). Prąd iskry ślizgowej można opisać wzorem:

$$i_s = \frac{d(C_s, U_s)}{dt} = C_s \frac{dU_s}{dt} + U_s \frac{dC_s}{dt} \quad (11.4)$$

gdzie: C_s – całkowita pojemność skrośna pod iskrą ślizgową, zwiększająca się w miarę rozwoju iskry,

U_s – średnia wartość napięcia na pojemności C_s , mniejsza od napięcia międzyelektrodowego o spadek napięcia wzdłuż wyładowania.

Składnika $C_s \frac{dU_s}{dt}$ nie należy utożsamiać ze zmiennością napięcia wymuszającego. Zmienność napięcia o częstotliwości technicznej nie odgrywa tu większej roli. Fakt, że wyładowania te powstają przede wszystkim przy napięciu przemennym, tłumaczy się oddziaływaniem ładunku przestrzennego, który w wyniku wyładowań powstaje w pobliżu krawędzi elektrody (1). Do łatwiejszego powstawania wyładowań ślizgowych przyczynia się nierównomierny rozkład pola elektrycznego na powierzchni dielektryku.

Toepler podał wzór, wyprowadzony doświadczalnie, na napięcie początkowe iskier ślizgowych w postaci:

$$U_{0,sl} = \frac{1.355}{C^{0.44}} \cdot [10^{-4} \text{ kV}] \quad (11.5)$$

gdzie: C – pojemność jednostkowa w F/cm^2 ; jest to pojemność przypadająca na 1 cm^2 powierzchni dielektryka, po której rozwijają się iskry ślizgowe.

W celu uproszczenia można przyjąć wykładnik przy C równy 0.5, a wówczas dla układu płaskiego otrzymamy prostą zależność:



$$U_s = k\sqrt{a} \quad (11.6)$$

gdzie: a – grubość dielektryku,

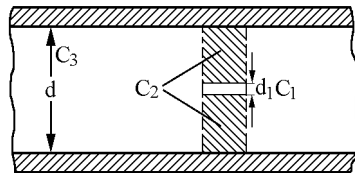
k – współczynnik zależny od rodzaju dielektryka, rodzaju ośrodka (powietrze, olej), rodzaju elektrod (metalowe, półprzewodzące).

Układami izolacyjnymi narażonymi najbardziej na wyładowania ślizgowe są izolatory przepustowe. Dla zwiększenia wytrzymałości takich układów izolacyjnych stosuje się różne środki zaradcze (patrz ćw. 3):

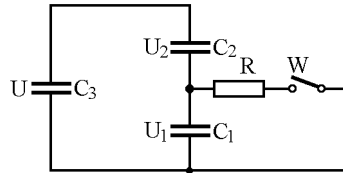
- zwiększenie grubości dielektryka stałego,
- zastosowanie żeber lub kloszy,
- zastosowanie kieszeni metalizowanych,
- sterowanie pojemnościowe (przepusty kondensatorowe).

1.3.3. Wyładowania wewnętrzne

Zjawisko wyładowania wewnątrz wtrąciny gazowej w dielektryku stałym wyjaśnimy analizując najprostszy model dielektryku z jedną wtrąciną płaską (rys. 11.4). Odpowiadający jemu schemat zastępczy przedstawia rys. 11.5.

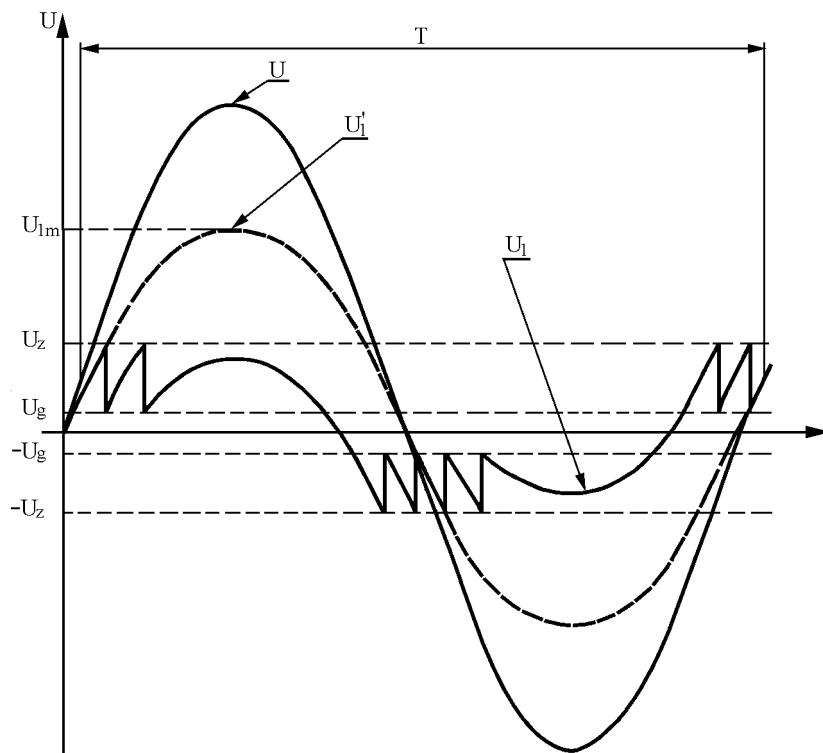


Rys. 11.4. Schemat układu izolacyjnego z wtrąciną gazową



Rys. 11.5 Schemat zastępczy dielektryku z wtrąciną gazową

Po zapłonie wyładowania we wtrącinie gazowej napięcie na niej spada do wartości, przy której wyładowanie gaśnie. Napięcie to nazywa się **napięciem gaśnięcia** U_g . Napięcie gaśnięcia jest o 30 ÷ 40 % niższe od **napięcia zapłonu** U_z . Jeśli napięcie przyłożone do układu przekracza napięcie, przy którym zaczynają pojawiać się we wtrącinie gazowej wyładowania, to wówczas napięcie panujące na tej wtrącinie zmienia się tak, jak pokazano na rys. 11.6. Mechanizm ten jest w rzeczywistości bardzo skomplikowany i ostatecznie nie wyjaśniony. Szczególnie, brak jest dobrego i łatwego w pomiarze wskaźnika określającego intensywność wyładowań niezupełnych. W ostatnim czasie, jako najbardziej miarodajną wielkość określającą intensywność wyładowań niezupełnych przyjmuje się moc dostarczoną do układu. Wiąże się to założeniem, że moc tracona w dielektryku na jego degradację powodowaną wyładowaniami niezupełnymi jest proporcjonalna do mocy dostarczonej do układu.



Rys. 11.6. Przebieg napięcia na układzie z rys. 11.4

U – napięcie na zaciskach układu izolacyjnego, U'_1 – napięcie na szczelinie gdyby wyładowania niepełne nie wystąpiły, U_1 – napięcie na szczelinie w przypadku wystąpienia wyładowań, U_z – napięcie zapłonu wyładowań, U_g – napięcie gaśnięcia wyładowań

Jedną z metod eliminowania wyładowań wewnętrznych jest stosowanie odpowiedniej technologii przy wykonywaniu układu izolacyjnego. Poprzez suszenie, odgazowanie i nasycanie w próżni układów złożonych z dielektryków stałych można ograniczyć liczbę i wielkość mikrowtrącin, tak aby próg jonizacji leżał wyżej niż napięcie robocze, tj. $U_j > U_m$.

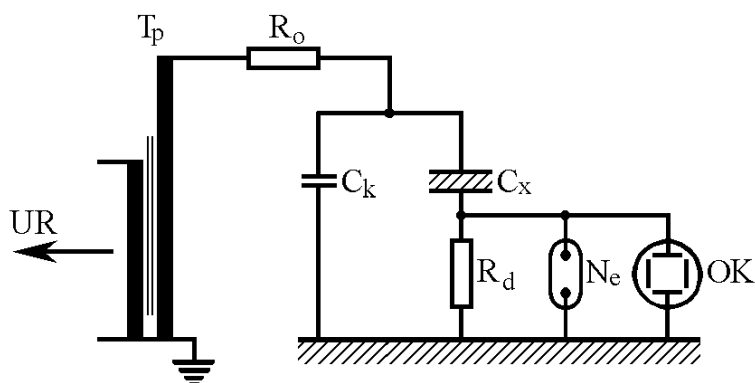
Eksperymentalnie próg jonizacji można wyznaczyć za pomocą mostka Scheringa, mierząc $\tan \delta$ w funkcji napięcia lub za pomocą oscyloskopu obserwując towarzyszące wyładowaniom niepełnym impulsy nałożone na krzywą napięcia roboczego.

2. POMIARY

2.1. Pomiar progu jonizacji

2.1.1. Pomiar progu jonizacji metodą oscylograficzną

Schemat połączeń



Rys. 11.7. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania progu jonizacji metodą oscylograficzną

UR – układ regulacji napięcia, C_k – kondensator blokujący, C_x – obiekt badany, R_d – rezystor detekcyjny, N_e – neonówka, OK – oscylograf katodowy, pozostałe oznaczenia jak na schematach układów probierczych

Sposób wykonania pomiaru

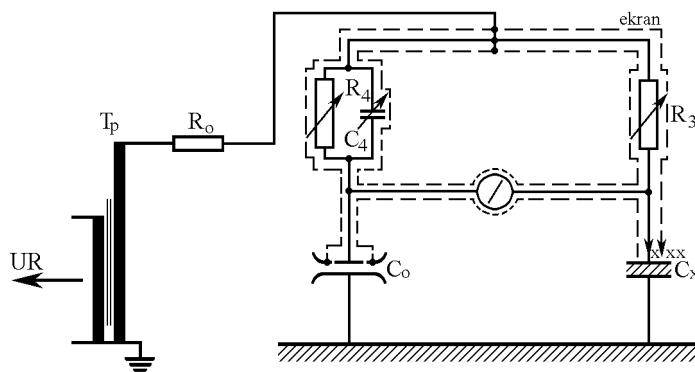
Należy pomierzyć napięcie U_j , przy którym we wtrącinie gazowej powstaną wyładowania niezupełne.

Opracowanie wyników pomiaru

W sprawozdaniu należy zamieścić oscylogramy uzyskane przy $U < U_j$ oraz $U > U_j$. Wyjaśnić ich przebieg. Podać wartość U_j .

2.1.2. Pomiar progu jonizacji przy użyciu mostka Scheringa

Schemat połączeń



Rys 11.8. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania progu jonizacji przy użyciu mostka Scheringa

UR – układ regulacji napięcia, C_o , C_4 , R_3 , R_4 – elementy mostka Scheringa, C_x – obiekt badany, pozostałe oznaczenia jak na schematach układów probierczych

Sposób wykonania pomiaru

Dla obiektu badanego w p.2.1.1 pomierzyć $\text{tg}\delta - f(U)$.

Uwagi:

1. Z mostka wyprowadzone są tylko dwie końcówki "x" oraz "xx"; "x" – żyła przewodu, "xx" – ekran przewodu.
2. Wzory na pojemność i współczynnik stratności obiektu badanego są następujące:

$$C_x = C_o \frac{R_4}{R_3} \quad (11.7)$$

$$\text{tg}\delta_x = \omega C_4 R_4 \quad (11.8)$$

3. W układzie pomiarowym, zastosowanym w ćwiczeniu, $C_o = 150$ pF.

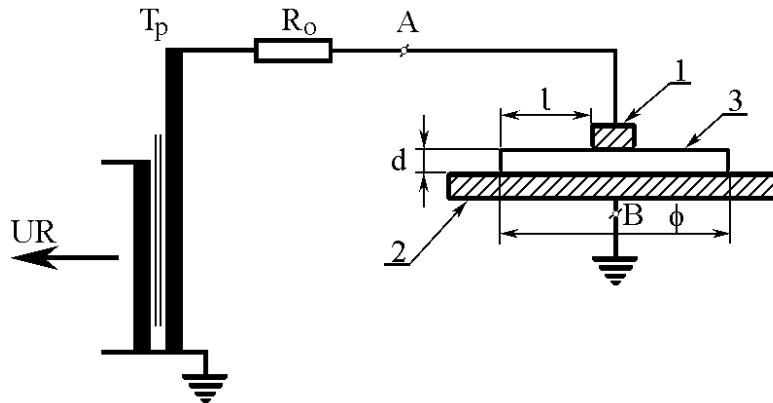
Opracowanie wyników pomiaru

W sprawozdaniu zamieścić wykres $\text{tg} \delta = f(U)$. Wyjaśnić kształt otrzymanej krzywej. Ustalić wartość U_j i porównać ją z wynikiem otrzymanym z pomiarów w p. 2.1.1.

2.2. Pomiar napięcia początkowego wyładowań ślizgowych

2.2.1. Układ płaski

Schemat połączeń



Rys 11.9. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania napięcia początkowego wyładowań ślizgowych

UR – układ regulacji napięcia, 1, 2 – elektrody, 3 – dielektryk, pozostałe oznaczenia jak na schematach układów probierczych

Sposób wykonania pomiaru

Należy dokonać pomiaru napięcia początkowego wyładowań ślizgowych w funkcji grubości dielektryku d przy stałej odległości elektrod l $U_{o\dot{s}l} = f(d)$ oraz $U_{o\dot{s}l} = f(l)$ przy $d = \text{const}$.

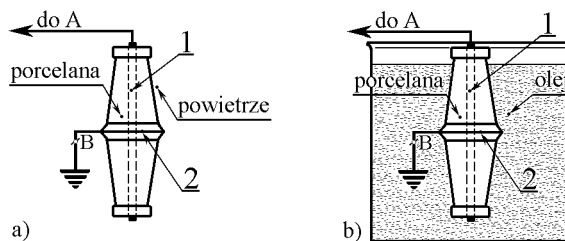
Opracowanie wyników pomiaru

Na podstawie otrzymanych wyników wykreślić $U_{o\dot{s}l} = f(l)$ oraz $U_{o\dot{s}l} = f(d)$ ($U_{o\dot{s}l}$ – wartość średnia z pięciu pomiarów). Omówić otrzymane wyniki. Przyj-

mując dla szkła $\varepsilon'_s = 5.3$ a dla bakelitu $\varepsilon'_b = 4.5$ wyliczyć, stosując wzór Teplera $U_{osl} = f(d)$ i narysować na wspólnym wykresie z zależnością empiryczną.

2.2.2. Izolator przepustowy

Schemat połączeń



Rys 11.10. Schemat podłączenia izolatora przepustowego do układu probierczego: a) w powietrzu, b) w oleju; 1, 2 – elektrody

Sposób wykonania pomiaru

Należy dokonać pomiaru napięcia początkowego wyładowań ślizgowych w dwóch przypadkach:

1. dla izolatora przepustowego w powietrzu,
2. dla izolatora przepustowego zanurzonego w oleju transformatorowym

Opracowanie wyników pomiaru

Podać wartości U_{osl} w obu przypadkach. Omówić środki zaradcze stosowane w praktyce dla podwyższenia napięcia początkowego wyładowań ślizgowych izolatorów przepustowych.

3. UWAGI I WNIOSKI

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

- [1] **Babikow M. A., Komarow N. S., Siergiejew A. S.:** Technika wysokich napięć. WNT, Warszawa 1967.
- [2] **Fleszyński J. – Praca zbiorowa:** Laboratorium wysokonapięciowe w dydaktyce i elektroenergetyce. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
- [3] **Flisowski Z.:** Technika wysokich napięć. WNT, Warszawa 1988.
- [4] **Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydrón P.:** Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia. PAN Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Warszawa 2001.
- [5] **Florkowska B.:** Podstawy metod badań układów izolacyjnych wysokiego napięcia. Wydawnictwo AGH, Kraków 1991.
- [6] **Florkowska B.:** Technika wysokich napięć. Wydawnictwo AGH, Kraków 1991.
- [7] **Hasterman Z., Mosiński F., Maliszewski A.:** Wytrzymałość elektryczna transformatorów energetycznych. WNT, Warszawa, 1983.
- [8] **Jakubowski J. L.:** Podstawy teorii przepięć w układach elektroenergetycznych. PWN, Warszawa 1968.
- [9] **Lidmanowski W.:** Zarys teorii wyładowań w dielektrykach. WNT, Warszawa 1988.
- [10] **Mosiński F.:** Metody statystyczne w technice wysokich napięć, Politechnika Łódzka 1991.
- [11] **Mosiński F.:** Podstawy techniki wysokich napięć. Politechnika Łódzka 1994.
- [12] **Sirotynski L. I.:** Technika wysokich napięć. Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa, 1954 r.
- [13] **Szczepański Z.:** Wyładowania niezupełne w izolacji urządzeń elektrycznych. WNT, Warszawa, 1973 r.
- [14] **Wodziński J.:** Wysokonapięciowa technika prób i pomiarów. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997.
- [15] **Praca zbiorowa pod redakcją Mościckiej – Grzesiak H.:** Inżynieria wysokich napięć w elektroenergetyce. Tom I i II. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1999 r.

